

Verformungsmessungen an faserbewehrten Mörteln zur Fugeninstandsetzung

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Boethovenstraße 12
D-38106 Braunschweig

Berichte zur Denkmalpflege-Forschung

Dipl.-Ing. C. Beecken
Dipl.-Ing. H. Wigger
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Mai 1997

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Vorhaben BAU 7025 B

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Problemstellung und Ziel	1
3	Objekte.....	4
3.1	Wirtschaftsgebäude des ehemaligen Klosters Walkenried	4
3.2	Kirche St. Johannis Ellrich.....	4
3.3	Runneburg Weißensee	5
4	Historische Baustoffe und deren Zustand	7
4.1	Allgemeines und Vorgehensweise	7
4.2	Baustoffe des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried und der Kirche St. Johannis Ellrich	7
4.2.1	Allgemeines.....	7
4.2.2	Mauerwerksstruktur des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried.....	7
4.2.3	Mauerwerksstruktur der Kirche St. Johannis in Ellrich	8
4.2.4	Eigenschaften des Harzer Dolomits	8
4.2.5	Eigenschaften des Altmörtels.....	9
4.3	Baustoffe der Runneburg/Weißensee.....	10
4.3.1	Mauerwerksstruktur	10
4.3.2	Eigenschaften des Travertins	11
4.3.3	Eigenschaften des Altmörtels.....	13
4.4	Weitere im Rahmen der BMBF-Forschung untersuchte Gesteinsarten.....	13
5	Mörtelsysteme und deren Eigenschaften	16
5.1	Entwicklung und Verarbeitung der Mörtelsysteme.....	16
5.2	Chemisch-mineralogische Eigenschaften der Mörtelsysteme.....	19
5.3	Physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mörtelsysteme	19
6	Untersuchte Prüfkörper	21
6.1	Grundsätzliches	21
6.2	Zugrundegelegtes Verbundmodell	21
6.3	Zweistein-Prüfkörper	22
6.4	Drei- und Vierstein-Prüfkörper.....	23
7	Meßprogramme.....	26
7.1	Allgemeines.....	26
7.2	Meß- und Auswertungstechnik	27
7.2.1	Setz-Dehnungsmessung	27
7.2.2	Induktive Wegaufnahme	28
7.2.3	Aufzeichnung thermischer und hygri-scher Daten.....	28
7.3	Untersuchungen an der Materialprüfanstalt Braunschweig	29
7.3.1	Vorversuche	29
7.3.2	Klimakammerversuche	30
7.3.3	Freibewitterungsversuche.....	31

7.4	Untersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried.....	33
7.4.1	Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern.....	33
7.4.2	Musterflächenuntersuchungen	34
7.5	Untersuchungen an der Kirche St. Johannis Ellrich.....	35
7.5.1	Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern.....	35
7.5.2	Musterflächenuntersuchungen	37
7.6	Untersuchungen an der Runneburg Weißensee	38
7.6.1	Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern.....	38
7.6.2	Musterflächenuntersuchungen	39
7.7	Zusammenfassender Überblick des Gesamtmeßprogramms	41
7.8	Ergänzende Untersuchungen nach Abbau der Versuchskörper	43
8	Gegenüberstellung und Vergleich der Verbund-/Verformungsmeßergebnisse	44
8.1	Ausgewertete Messungen und Vorgehensweise	44
8.2	Betrachtung von Gesamtzeiträumen	48
8.2.1	Freibewitterungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig.....	48
8.2.2	Freibewitterungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried	50
8.2.3	Freibewitterungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich	51
8.2.3.1	Untersuchungen an Dreisteinkörpern.....	51
8.2.3.2	Untersuchungen an Viersteinkörpern.....	52
8.2.3.3	Musterflächenuntersuchungen	54
8.2.4	Freibewitterungsuntersuchungen an der Runneburg in Weißensee	55
8.2.4.1	Untersuchungen an Dreisteinkörpern.....	55
8.2.4.2	Musterflächenuntersuchungen	56
8.3	Betrachtung von Zeitausschnitten mit Niederschlagsereignissen	57
8.3.1	Untersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried.....	57
8.3.2	Untersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich	59
8.3.3	Untersuchungen an der Runneburg in Weißensee	61
9	Zusammenfassung.....	63
10	Literatur.....	67
	Anhang	

Abkürzungsverzeichnis

Großbuchstaben

BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
D	Dolomit
E	Elastizitätsmodul
HGJ	Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement, ergänzt durch Gießereibinder
HGQ	Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement, ergänzt durch Quellzement
HGZ	Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement
IWM	Induktive Wegmessung
JOS	Dem Sandstrahlen verwandtes Verfahren zur Reinigung von Oberflächen unter Verwendung von Glasmehl
LCF	Ligno-Cellulosefasern
MPA	Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen
R	Widerstand eines Bauteils gegenüber Spannungseinwirkung
Re	Marktgängiger Sanierputz
S	Einwirkung auf ein Bauteil
SDM	Setzdehnungsmessung
Si	Mörtel der Gesamthochschule Siegen
T	Travertin
WKI	Fraunhofer Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klaudert-Institut)

Kleinbuchstaben

b	Breite	[cm]
h	Höhe	[cm]
l	Länge	[cm]
m	Masse	[g]
r. F.	Relative Luftfeuchtigkeit	[%]
w/b	Wasser-Bindemittelwert	

Griechische Buchstaben

β	Festigkeit	[N/mm ²]
ϵ	Dehnung	[mm/m] bzw. [‰]
ρ	Rohdichte	[g/cm ³]
σ	Spannung	[N/mm ²]

Fußzeiger

o	Homogene Verfugung mit Fasermörtel bis an die Außenkante des Mauerwerks
d	Tag
D	Druck-
dyn	dynamisch
E	Eigen-
EL	Im Rahmen der Untersuchungen in Ellrich modifizierte Variante
HZ	Haftzug-
Mö	Mörtel-
R	Mörtelfuge im Bereich der äußeren 2 cm mit einem marktgängigen Mörtel hergestellt
RU	Im Rahmen der Untersuchungen an der Runneburg in Weißensee modifizierte Variante
S	Mörtelfuge im Bereich der äußeren 2 cm mit einem Mörtel der Gesamthochschule Siegen hergestellt
St	Stein-
SZ	Spaltzug-
um	Nicht modifizierte (Ursprungs-) Variante
Z	Zug-
ZW	Zwang-

Weitere, nur einmal verwendete Zeichen werden im Text erläutert.

1 Einleitung

Bauwerke bzw. ihre Teile erfahren in Abhängigkeit von ihrer Beanspruchung Verformungen. Das spezifische Verformungsverhalten eines Baustoffs hängt wesentlich von seiner Struktur ab, kann aber zusätzlich durch sein Alter und Umgebungsbedingungen wie Belastungsdauer, Temperatur- und Feuchteeinwirkung beeinflusst werden.

Im Rahmen von Untersuchungen zur dauerhaften Neuverfugung von historischen Gebäuden aus Natursteinmauerwerk befaßt sich die BMBF-Forschung zur Denkmalpflege mit der Mörteloptimierung. Dies erfordert die Messung und Registrierung von Verformungen an Bauwerken bzw. ihren Teilen. Je kleiner die zu messenden Wegstrecken bzw. Wegänderungen sind, desto aufwendigere Verfahren werden erforderlich, um sie zu erfassen. An der Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA) Braunschweig wurden mittels Setzdehnungsmessung und Induktiver Wegaufnahme über Zeiträume von einigen Monaten bis mehreren Jahren Meßreihen an Prüfkörpern, die teils natürlich, teils künstlich bewittert wurden, durchgeführt.

Der vorliegende Bericht befaßt sich anhand der Materialkennwerte untersuchter Mörtel-Natursteinkombinationen und begleitend durchgeführter Registrierung klimatischer Randbedingungen mit dem Vergleich und der Interpretation ermittelter Verformungsmeßergebnisse. Darüber hinaus werden die eingesetzten Prüfkörper bezüglich ihrer Eignung zur Simulation tragenden Mauerwerks untersucht und beurteilt.

2 Problemstellung und Ziel

Der Mörtel von Mauerwerk dient neben der Zusammenfügung von Einzelsegmenten - den Mauersteinen - zu flächenhaften Bauteilen dem Lastabtrag. Ein in die vorderen Zentimeter der Mauerwerksfugentiefe eingebrachter Mörtel gewährleistet den äußeren Abschluß des Mauerwerks und den Witterungsschutz. Diese Aufgaben kann der Verfugmörtel um so besser erfüllen, je besser seine rißfreie Haftung am Stein ist und je unempfindlicher er gegenüber thermisch-hygrischen Witterungseinflüssen reagiert. Ein guter Stein-Mörtel-Verbund gewährleistet demnach eine große Dauerhaftigkeit der Verfugung und damit des Mauerwerks /1/.

Besonders für die Erhaltung historischer Bausubstanz aus Natursteinmauerwerk stellt die überlegte Wahl von Verfugmörtelsystemen ein wichtiges Kriterium für die Erfolgsaussichten einer Sanierungsmaßnahme dar. Fehlende Voruntersuchungen über die individuelle Verträglichkeit zwischen vorhandenem Altmaterial und dem angestrebten Verfugmörtelsy-

stem haben in der Vergangenheit zu großen Schäden an „sanierten“ Objekten geführt. Es traten insbesondere rißauslösende bzw. standfestigkeitsmindernde Treibreaktionen auf, deren spätere Behebung häufig teurer war als der vorausgegangene Sanierungsversuch /1/.

Es ist bekannt, daß auf die Abstimmung eines zur Neuverfugung vorgesehenen Mörtels mit der gegebenen baulichen Situation nicht verzichtet werden kann. Klare Entscheidungskriterien gibt es nicht. Der richtige Mörtel für die Instandsetzung von Natursteinmauerwerk muß also anhand sorgfältiger Untersuchungen und Prüfungen für jede Sanierungsmaßnahme individuell ermittelt werden /21/. Die objektspezifische Mörtelanpassung erfolgt in der BMBF-Denkmalpflegeforschung an Pilotobjekten. In Niedersachsen und Thüringen gibt es eine Vielzahl von historischen Natursteinbauten, die mit Gipsmörtel errichtet wurden. Die MPA Braunschweig befaßt sich mit Objekten in Walkenried (Wirtschaftsgebäude des dortigen ehemaligen Klosters), Ellrich (Kirche St. Johannis) und Weißensee (Runneburg).

Die Untersuchungen am *Wirtschaftsgebäude des ehemaligen Klosters Walkenried* erfolgten im Rahmen der Mörtelentwicklung für das stark feuchtebelastete Mauerwerk von Kirchenschiff und Chor der *Kirche St. Johannis*, die in Bereichen tiefer Flankenabrisse und starker Mörtelherauslösung einer Fugensanierung bedarf /33/, /35/. Das aufgehende Mauerwerk der *Runneburg* weist Setzungserscheinungen und Hangabwärtsbewegungen infolge von Aufstockungen, Nutzungsänderungen und Erdauffüllungen bei mangelhafter Gründung des Baukörpers sowie durch Witterungseinfluß und unsachgemäße Sanierungen auf.

Bei allen Bauwerken wurde Gipsmörtel verwendet. Da die Verwendung eines herkömmlichen Portlandzements Treibreaktionen zwischen Gips und Zement hervorrufen würde, untersuchte die MPA Braunschweig die Eignung eines faserbewehrten Mörtels des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung (WKI), dessen Bindemittel speziell für die Sanierung gipshaltigen Mauerwerks entwickelt wurde /37/. Dieser Mörtel wurde zahlreichen Prüfungen unterzogen. Neben der Verträglichkeit zwischen Gipsmörteln und dem neu entwickelten Fasermörtel /31/ wurde sein Verbundverhalten gegenüber verschiedenen Natursteinarten untersucht /44/. Veränderungen im Verbund zwischen Mörtel und Naturstein lassen sich zerstörungsfrei einerseits an den Verformungen beider Stoffe und andererseits optisch an einer Rißenstehung erkennen. Der Einfluß der Witterung ist für die Verbundqualität und damit für die Dauerhaftigkeit der Neuverfugung maßgebend. Deshalb wurden neben Klimakammer- und Freibewitterungsversuchen an den zu sanierenden historischen Materialien In-situ-Betrachtungen vorgenommen. Dabei wurden unter Verwendung unterschiedlicher, auf Grundlage der Rezeptur des Fraunhofer-Instituts entwickelte Mörtelvari-

anten hergestellte Verbundprüfkörper unter langandauernder freier Bewitterung beobachtet, um geeignete objektspezifische Saniermörtel zu finden. Diese wurden anschließend an der bestehenden Bausubstanz bei der Anlegung von Musterverfugungen verwendet /1/, /33/, /34/, /35/.

An den bewitterten Prüfkörpern und Musterflächen wurden von April 1992 bis Dezember 1996 bei begleitender Aufzeichnung der Klimadaten, relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Sonnenenergie, Niederschlag und Schlagregen, Verformungsmessungen durchgeführt. Für die Messungen kamen parallel zwei Verfahren zur Anwendung. Mit periodischen Setzdehnungsmessungen wurden horizontale und vertikale Bewegungen des Fugenmaterials sowie des Natursteins aufgenommen. Daneben wurden mit induktiven Wegmessungen quasi-kontinuierlich vertikale Verformungen des Fugenmaterials und des Natursteins erfaßt /1/, /33/, /34/, /35/.

Die Meßergebnisse beinhalten vielfältige Informationen über die Eignung der verwendeten Fasermörtel als Verfugmörtel für die Sanierungsaufgaben in Walkenried, Ellrich und Weisensee. Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden die Untersuchungsobjekte vorgestellt und anhand von Gegenüberstellungen der Ergebnisse aus Musterflächenbetrachtungen und Verbundprüfkörperuntersuchungen Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit der eingesetzten Mörtel und Prüfkörper gezogen.

3 Objekte

3.1 Wirtschaftsgebäude des ehemaligen Klosters Walkenried

Das Wirtschaftsgebäude des ehemaligen Klosters steht in Walkenried/Südharz (Niedersachsen). Die Außenwände des rechteckigen eingeschossigen Baus (siehe Bild 3.1) bestehen aus Natursteinmauerwerk, das in regellosem Bruchsteinverband vermauert wurde. Das Zisterzienserkloster wurde im Jahr 1129 gegründet. Die gotische Klosterkirche, die im Bauernkrieg 1525 verwüstet wurde und als Ruine bis heute erhalten ist, und die Klausurgebäude stammen aus dem 13. und 14. Jahrhundert; das Wirtschaftsgebäude wurde im 19. Jahrhundert erbaut.



Bild 3.1: Ansicht des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried

3.2 Kirche St. Johannis Ellrich

Das untersuchte Sanierungsobjekt steht in Ellrich/Südharz (Thüringen). Die Außenwände der ursprünglich aus dem 13. Jahrhundert stammenden Kirche bestehen aus Natursteinmauerwerk. Sie wurden als zweischaliges Mauerwerk, außen mit Werksteinen in regelmäßigem

Schichtenverband, innen mit Bruchsteinen in regellosem Verband ausgeführt. Der heutige Baukörper (siehe Bild 3.2) ist durch drei große Brände geprägt. Chor und Sakristei stammen aus einem Wiederaufbau im 17. Jahrhundert, Langhaus und Querschiff wurden im späten 19. Jahrhundert neu erstellt. Ein Brand um 1900 beschädigte den Turm so stark, daß er in den dreißiger Jahren mittels Vernadelung und Zementinjektion konsolidiert werden mußte. Aufgrund mangelnder Standsicherheit infolge von Treibreaktionen wurde der Turm im Jahr 1960 abgetragen. Mangelnde Bauunterhaltung, Löscharbeiten in Zusammenhang mit den Bränden und das Fehlen des Dachs in der Nachkriegszeit bis in die 90er Jahre haben eine bis heute hohe Feuchtebelastung des Mauerwerks zur Folge /3/, /30/, /35/, /40/.



Bild 3.2: Ansicht der Kirche St. Johannis (1993) /35/

3.3 Runneburg Weißensee

Die Runneburg in Weißensee/Thüringen (siehe Bild 3.3) ist in ihrer Form als Wallbebauung mit Torhaus ein wichtiges Zeugnis der Bauepochen Romanik und Renaissance. Palas, Wohnturm und Torbau entstanden im 12. Jahrhundert als älteste Teile der heutigen Anlage auf den Grundmauern eines bereits vorher bestehenden Festungsbauwerks. Um 1580 erfolgten Umbauten des Palas, der einen Verputz bzw. eine Schlämme erhielt. Diese Maßnahmen und weitere Umbauten wie die Neubedachung des Turms in Haubenform im Zuge seiner Verkürzung (1750) prägen das heutige Bild. Die Außenwände bestehen im wesentlichen aus zwei- und dreischaligem Mauerwerk. Es sind komplexe Bauschäden festzustellen,

die auf Setzungserscheinungen infolge von Aufstockungen, Nutzungsänderungen, Erdauffüllungen bei mangelhafter Gründung und Hangabwärtsbewegungen des Baukörpers sowie auf Witterungseinflüsse und unsachgemäße Sanierungen zurückzuführen sind. In den Jahren 1978/81 wurde ein Teil des Palasmauerwerks sowie weite Teile der Gründung von Turm und Palas mit Zement injiziert. Im Jahr 1990 wurden erhebliche Schadensfortschritte infolge Ettringittreibens und Lasterhöhungen beobachtet /20/, /38/, /39/, /41/.



Bild 3.3: Ansicht der Runneburg von Süden (1990) /38/

4 Historische Baustoffe und deren Zustand

4.1 Allgemeines und Vorgehensweise

Im folgenden werden die Schadensbilder sowie die chemisch-mineralogischen, hygrischen und mechanischen Eigenschaften der Baustoffe zusammengefaßt, die beim Bau des Wirtschaftsgebäudes des Klosters Walkenried, der Kirche St. Johannis in Ellrich und der Runneburg in Weißensee Verwendung fanden. Daneben finden einige Gesteinsarten Beachtung, die im Rahmen der BMBF-Forschungen zusätzlich untersucht wurden. Es wird bei besonderer Berücksichtigung der für die Verbundproblematik maßgebenden hygrischen und mechanischen Eigenschaften zusammenfassend über die Ergebnisse von Untersuchungen an der MPA Braunschweig berichtet. Dies sind die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Baustoffe, ihre Porenstruktur, ihr Wasseraufnahmeverhalten, ihr Elastizitätsmodul und ihre Biegezug- und Druckfestigkeit. Dabei werden auf Grundlage der Angaben in /33/, /34/, /35/ maßgebende Kennwerte ausgewählt und überwiegend Mittelwerte angegeben.

4.2 Baustoffe des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried und der Kirche St. Johannis Ellrich

4.2.1 Allgemeines

Sowohl in Walkenried als auch in Ellrich wurde für das aufgehende Mauerwerk Harzer Dolomit aus Steina bei Bad Sachsa am südlichen Harzrand /14/, /29/, /32/ verwendet, der mit Gipsfugenmörtel vermauert wurde. In Ellrich erfolgten Ausbesserungen der Verfugung teils mit Gips-, teils mit Kalk- und Kalkzementmörtel /35/.

4.2.2 Mauerwerksstruktur des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried

Das Außenmauerwerk des Wirtschaftsgebäudes des ehem. Klosters Walkenried besteht aus einschaligem Bruchsteinmauerwerk. Der verwendete Harzer Dolomit wurde in regellosem Verband mit Gipsfugenmörtel vermauert. Die Untersuchungen in Walkenried wurden auf-

grund der Übereinstimmung der verwendeten Baumaterialien im Zuge der Mörteloptimierung für das Pilotobjekt Ellrich (siehe Abschnitt 4.2.3) durchgeführt.

4.2.3 Mauerwerksstruktur der Kirche St. Johannis in Ellrich

Das im Quaderverband hergestellte aufgehende Außenmauerwerk der Kirche ist zweischalig aufgebaut /45/. Die Innenschale besteht aus Bruchsteinmauerwerk und ist zwischen 50 und 65 cm dick. Die Außenschale hat eine Stärke von ca. 35 cm und weist einen heterogenen Fugenaufbau aus Preßfugen und breiteren Stoßfugen (bis ca. 3 cm) auf. Der in den Fugen anzutreffende Mauer- und Verfumörtel ist neben Kalkmörtel überwiegend mit Gipsstein gemagerter Gipsmörtel. Er wurde sowohl im 13. Jahrhundert beim Bau der Kirche als auch bei den o. g. Wiederaufbau- und Sanierungsarbeiten verwendet. Außerdem kamen zwei Verfumörtel zum Einsatz, die vermutlich aus dem 20. Jahrhundert stammen. Die Stoßfugen sind durch sehr starke Flankenrisse bis hin zum völligen Herauslösen des Mörtels geschädigt. Dies hat einen fortschreitenden Feuchteintrag zur Folge, der zur Herauslösung wasserlöslicher Anteile des im Gips enthaltenen Calciumsulfats führt. Aus diesem Grund war neben einer Erneuerung der Dacheindeckung besonders im Bereich der Gründung und der Strebepfeiler eine Neuverfugung im Zuge konstruktiver Sicherungsmaßnahmen erforderlich (siehe Bild 4.1) /35/.

4.2.4 Eigenschaften des Harzer Dolomits

Der Harzer Dolomit ist ein typisches Sedimentgestein aus dem Zechstein (geologisches Alter 230 Mio. Jahre), das aus einem oolithischen Kalkstein entstanden ist, dessen Feinstruktur durch frühdiagenetische Dolomitisierung verwischt wurde. Die Farbpalette der in Walkenried und Ellrich vermauerten Steine reicht von hellgrau/braun über verschiedene Zwischenstufen bis dunkelgrau/braun. Der Dolomit zeichnet sich durch hohe Festigkeit und gute Bearbeitbarkeit aus /14/, /29/, /32/.

Mineralogisch besteht der Harzer Dolomit zu 99 Vol.-% aus Dolomit und 1 Vol.-% Calcit mit geringen Anteilen von Bindemittel. Es handelt sich um einen sehr dichten Stein mit schwacher Kapillaraktivität. Der *Porenraum* wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie zu 3,85 Vol.-% ermittelt. Ein sichtbarer Porenanteil (Durchmesser > 5 µm) ist kaum vorhanden. *Rein-* und *Rohdichte* differieren mit 2,85 bzw. 2,74 g/cm³ aufgrund der geringen Porosität kaum. Dementsprechend gering fällt die *Wasseraufnahme* unter Atmosphären-

druck nach DIN 52103 /5/ mit 1,07 Gew.-% aus. Die *Porenverteilung* des Harzer Dolomits hat ein schwaches Maximum bei einem Radius von 1,5 μm , die Radien der meisten Poren liegen darunter /35/.



Bild 4.1: St. Johannis in Ellrich, Fugenzustand am Strebepfeiler des südlichen Langhauses /35/

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte des Dolomits in Anlehnung an DIN 52105 /6/ und DIN 52112 /7/ ergab eine *Spaltzugfestigkeit* $\beta_{SZ, st}$ von 5,9 bis 7,0 N/mm², eine mittlere *Druckfestigkeit* $\beta_{D, st}$ von über 90 N/mm² und sehr hohe Werte für den dynamischen *E-Modul* E_{dyn} im Bereich von 21,5 bis 81,5 N/mm² /35/.

4.2.5 Eigenschaften des Altmörtels

An der MPA Braunschweig wurden auf naßchemischem Wege und mittels Röntgenfeinstrukturanalyse einige Mörtelproben aus dem Außen- und Innenbereich der Kirche St. Jo-

hannis untersucht /42/. Diese Nachweise werden ergänzt durch Ergebnisse der MPA Bremen und des Ingenieurbüros GUD, Leipzig /15/, /28/. Es ergaben sich folgende Zusammensetzungen:

- Proben aus *Kirchenschiff und Chor*: Reine Gipsmörtel mit geringem Anhydrit-/Halbhydratanteil und Gipsmörtel mit zahlreichen Zuschlägen wie Quarz, Feldspäte, Gips, Anhydrit, Dolomit, Holzstückchen und Holzkohleteilchen,
- Proben aus dem *verpreßten Turmmauerwerk*: C₃A-„freier“ und somit hochsulfatbeständiger Zement, dennoch Bildung der Treibminerale Thaumasit und Ettringit; gipsgebundene, mit Gipssteinkörnern von bis zu 10 mm Durchmesser gemagerte Mörtel mit Anhydritanteil,
- Proben der Ausblühungen des *südöstlichen Strebepfeilers*: Glaubersalz und Gips in gleichen Anteilen,
- Mörtelproben aus dem *Baugrund*: Wie im Turmmauerwerk gipsgebundene, mit Gipssteinkörnern von bis zu 10 mm Durchmesser gemagerte Mörtel mit Anhydritanteil, im Bereich von Fundamentverbreiterungen aus den 1930er Jahren kalk- bzw. zementgebundene Mörtel mit Ettringitbildung /15/, /28/, /42/, /45/.

Die naßchemische Analyse der Verfugmörtel des nördlichen Langhauses ergab, daß als Verfugmörtel einerseits ein stark holzkohlehaltiger Gipsmörtel, andererseits ein mit Sand gemagerter Kalk- oder Kalkzementmörtel verwendet wurde /35/.

4.3 Baustoffe der Runneburg/Weißensee

Beim Bau der Runneburg in Weißensee wurde für die Außenschale überwiegend Travertin verwendet und mit Gipsmörtel vermauert. Ausbesserungen der Verfugung erfolgten teils mit Gips-, teils mit Kalkzementmörtel /34/.

4.3.1 Mauerwerksstruktur

Beim Bau der Runneburg wurden für die Außenschale des aufgehenden Mauerwerks Travertinquader unterschiedlicher Varietät vermutlich aus Ehringsdorf bei Weimar oder Langensalza /16/, /19/, für die Innenschale Steine geringer Größe und verschiedener Arten (Gipsgestein, Tonstein und poröser Travertin) verwendet. Die Vermauerung erfolgte mit

Gipsmörtel. Durch Ausbesserungen der Verfugung mit zementgebundenen Mörteln und infolge der oben genannten Injektion des Mauerwerks und der Gründung kam es neben einer erheblichen Lasterhöhung und starkem Feuchteeintrag zu Treibmineralbildung und Herauslösung wasserlöslicher Anteile des im Gips enthaltenen Calciumsulfats. Dies führte entgegen der verfolgten Absicht zu einer erheblichen Verschärfung der Gefügeprobleme /25/, /27/, /34/.

4.3.2 Eigenschaften des Travertins

Der Travertin ist ein inhomogener, poröser Süßwasserkalkstein aus dem Quartär und somit ein geologisch sehr junges Sedimentgestein. Die für die Runneburg verwendeten Steine weisen mit dem bloßen Auge erkennbare Inkrustationen von Blättern und Stengeln auf, eine lagige Schichtung ist jedoch kaum auszumachen. Die anzutreffenden Farben liegen im Bereich von dunkelgelb bis ocker /29/, /34/.

Mineralogisch besteht der Travertin aus den o. g. Thüringischen Lagerstätten zu 99 % aus Calcit und geringen Anteilen von Quarzit und Kaolinit /26/. Die Struktur des Steins kann als stark porös bis mittelporig bezeichnet werden. Die Gesteinseigenschaften wurden an 100 Probewürfeln der Kantenlänge 10 cm aus Abbruchmaterial verschiedener Mauerwerksabschnitte der Burganlage bestimmt. Aufgrund erheblicher Schwankungsbreiten in Struktur und Farbe und somit der zu erwartenden starken Streuungen der Materialkennwerte, wurde zum Zweck besserer Beurteilungsmöglichkeiten eine grobe Einteilung der Proben in Gruppen nach mit bloßem Auge erkennbarer Porenstruktur, Masse und Farbe vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 wiedergegeben. Die Mehrzahl der geprüften Würfel konnte aufgrund inhomogen verteilter Poren und kaum erkennbarer Schichtung Gruppe IV zugeordnet werden. In Gruppe I wurden lediglich zwei sehr dichte und schwere Prüfkörper eingeordnet. Die übrigen Gruppen waren zahlenmäßig etwa gleich stark vertreten /34/.

Im folgenden werden die Materialkennwerte des Gesteins nach Angaben aus /34/ zusammengefaßt. Rohdichte- und Druckfestigkeitswerte wurden in Anlehnung an DIN 52105 /6/ ermittelt, der Elastizitätsmodul nach der Methode der Schalllaufzeitmessung mittels Longitudinalwellen. Die beim Bau der Runneburg verwendeten Travertinvarietäten erwiesen sich als deutlich heterogen. Es ergaben sich *Rohdichten* zwischen $\rho_{sI} = 0,97$ und $2,49 \text{ g/cm}^3$. Die mittleren *Druckfestigkeiten* lagen zwischen $\beta_{D, sI} = 0,85$ und $56,1 \text{ N/mm}^2$, wobei die Schwankungsbreite um den Mittelwert von $\beta_{D, sI} = 5,8 \text{ N/mm}^2$, der von Gruppe IV ziemlich

genau erreicht wurde, recht groß ist. Anhand der gruppenabhängigen *Elastizitätsmoduln*, die im Bereich von $E_{dyn, St} = 6.600$ bis 31.630 N/mm^2 liegen, erwies sich, daß eine relativ hohe Rohdichte nicht zwangsläufig auch eine hohe Steifigkeit zur Folge hat. Sowohl Gruppe I als auch Gruppe IV erreichen - bei erheblich abweichenden Rohdichten - den maximalen Elastizitätsmodul /34/.

Tabelle 4.1: Thüringischer Travertin: Einteilung der beim Bau der Runneburg verwendeten Varietäten nach Struktur, Masse und Farbe /34/

Gruppe	Struktur			Farbe
	Dichte	Schichtung	Masse	
I	sehr dicht	geschichtet	sehr hoch	hellbeige
II	sehr porös; grob, hohlraumreich; pflanzl. Einschlüsse	--	gering	hellbeige
III	mitteldicht	geschichtet	hoch	hellbeige
IV	inhomogen porös	keine Schichtung	hoch	hellbeige
V	porös	kaum geschichtet	gering	hellbeige bis bräunlich
VI	sehr grob strukturiert; hoher Poren- bzw. Hohlraumanteil	--	gering	hellbeige

Die *Biegefestigkeit* bzw. *Biegezugfestigkeit* $\beta_{BZ, St}$ des Thüringischen Travertins wurde abweichend von DIN 52112 /7/ ($300 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) an Prismen des Formats ($l \times b \times h$) $100 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, deren Herstellung aus den o. g. Prüfwürfeln möglich war, ermittelt. Die erzielten Ergebnisse sind demzufolge nur als grobe Richtgrößen zu verstehen. Aus Gruppe I stand nicht genügend Steinmaterial zur Verfügung, so daß in diesem Fall auf Ermittlungen der Biegezugfestigkeit verzichtet werden mußte. Die Ergebniswerte liegen im Bereich zwischen $\beta_{BZ, St} = 1,85$ (Gruppe II) und $6,77 \text{ N/mm}^2$ (Gruppe III). Untersuchungen an Prüfkörpern im DIN-Format hätten vermutlich geringere Werte ergeben /34/.

Die kapillare *Wasseraufnahme* nach DIN 52617 /8/ wurde stellvertretend für alle Prüfkörper an den Travertingruppen II, IV und VI ermittelt. In allen Fällen ist die Wasseraufnahme aufgrund der Porosität des Travertins hoch und steigt naturgemäß mit sinkender Rohdichte an /34/.

Zusätzlich wurden mittels Quecksilberdruckporosimetrie die *Porengrößenverteilung* und das *kumulative Porenvolumen* (Porenradienbereich $0,001 - 100 \mu\text{m}$) an Präparaten aus Prüfkörpern der Gruppen I, II, III, IV und VI ermittelt. Die Ergebnisse der Quecksilber-

druckporosimetrie unterscheiden sich für die einzelnen Steingruppen erheblich. Die Proben aus Gruppe II weisen mit 21,82 Vol.-% das größte kumulative Porenvolumen auf, gefolgt von Gruppe VI mit 19,94 Vol.-%. Bei Proben aus den Gruppen II und IV konnten Werte von etwa 14 Vol.-% festgestellt werden, für solche aus Gruppe I 10,63 Vol.-%. Dies entspricht - wie anhand der oben vorgestellten übrigen Kennwertermittlungen zu erwarten - der kleinsten Porosität. Infolge der Präparatsabmessungen ergaben sich für die verschiedenen Travertingruppen ähnliche Rohdichten /34/.

4.3.3 Eigenschaften des Altmörtels

An der Runneburg wurden bei einer Beprobung im Juli 1995 verschiedene Fugenmörtel sowie ein Putz- bzw. Schlämmörtel angetroffen. Neben Mörtelstichproben wurde eine Gipssteinprobe entnommen. Mittels chemisch-mineralogischer Untersuchungen wurden die Zusammensetzungen durch Röntgenbeugung, Differenzthermoanalyse und Dünnschliffuntersuchungen ermittelt. Dabei ergaben sich folgende Mörtelzusammensetzungen:

- Fugenmörtel: Sehr reine Gipsmörtel mit Anhydritzuschlag,
- Verfügmörtel Ostfassade, Kellergeschoß: Sehr reine Gipsmörtel mit Anhydritzuschlag,
- Verfügmörtel Südfassade, Erdgeschoß: zementgebundener Mörtel mit Sandzuschlag,
- Putzmörtel Südfassade: Sehr reine Gipsmörtel mit Ziegelmehlzusatz und Anhydritzuschlag /34/.

Die angetroffenen historischen Gipsfugenmörtel weisen relativ geringe Druckfestigkeiten auf und sind somit gut auf den minderfesten Travertin abgestimmt /34/.

4.4 Weitere im Rahmen der BMBF-Forschung untersuchte Gesteinsarten

Zusätzlich wurden an weiteren Natursteinen Verbunduntersuchungen durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten unterschiedlich stark wassersaugender Gesteinsarten verschiedener Porenstrukturen bei Verwendung gleichartiger Mörtelsysteme untersucht, um Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Porosität und Haftverbund zu ermöglichen. Folgende Natursteinarten wurden betrachtet:

- Sander Schilfsandstein,

- Rütthener Grünsandstein und
- Zwickauer Kohlesandstein /33/.

Weitere Untersuchungen am Zwickauer Kohlesandstein wurden am Institut für Baustoffe und Tragwerke der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

Die untersuchten Gesteine weisen Parallelen auf. Es handelt sich um drei Sandsteine. Der *Sander Schilfsandstein* ist vorwiegend tonig-chloritisch gebunden, der *Rütthener Grünsandstein* weist eine barytisch-tonige Mischbindung auf und der *Zwickauer Kohlesandstein* besitzt eine hauptsächlich tonig-sericitische Bindung. *Sander Schilfsandstein* und *Rütthener Grünsandstein* sind im Gegensatz zum durch kohlige Lagen deutlich gekennzeichneten *Zwickauer Kohlesandstein* kaum, bis undeutlich geschichtet. In Hinsicht auf den sichtbaren Anteil des Porenraums ($> 5 \mu\text{m}$) ähneln sich *Sander Schilfsandstein* und *Zwickauer Kohlesandstein* mit jeweils ca. 14 %, während der *Rütthener Grünsandstein* mit 21 % einen deutlich größeren Anteil aufweist /33/.

Die Gesteine unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Porositäten, Festigkeiten und Elastizitätsmoduln deutlich. Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der genannten Gesteine wurden mit den in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Methoden ermittelt, wobei eine statistische Auswertbarkeit aufgrund kleiner Prüfkörperreihen nicht gegeben ist /33/.

Der *Sander Schilfsandstein* hat eine deutliche Porosität von 20,1 Vol.-%. Bei einer Wasseraufnahme von 6,45 Gew.-% ist ein deutlicher Saugeffekt gegenüber dem frischen Mörtel zu erwarten. Noch ausgeprägtere Saugeigenschaften hat der *Rütthener Grünsandstein* mit noch deutlich höherer Porosität und größerer Wasseraufnahme. Anders der *Zwickauer Kohlesandstein*: Seine Porosität ist deutlich geringer als die der beiden anderen Gesteinsarten /33/.

Die Porenanalyse bestätigt die obigen Angaben. Der *Sander Schilfsandstein* weist ein deutliches Maximum des Porenvolumens bei $4,0 \mu\text{m}$ auf, während im Fall des *Rütthener Grünsandsteins* eine Häufung bei $10,0 \mu\text{m}$ auftritt. Das Maximum der Porenvolumenverteilung des *Zwickauer Kohlesandsteins* liegt hingegen bei nur $2,0 \mu\text{m}$.

Die ermittelten Zugfestigkeiten nehmen in der Reihe *Sander Schilfsandstein* ($\beta_{Z, st} = 3,0$ bis $18,0 \text{ N/mm}^2$) über *Rütthener Grünsandstein* ($\beta_{Z, st} = 1,1$ bis $8,4 \text{ N/mm}^2$) und *Zwickauer Kohlesandstein* ($\beta_{Z, st} = 0,3$ bis $0,4$ bzw. $0,7$ bis $1,3 \text{ N/mm}^2$) kontinuierlich ab. Die gleiche

Reihenfolge gilt für die dynamischen Elastizitätsmoduln: Sie reichen von $E_{dyn} = 16.000$ bis 18.600 N/mm^2 (*Schilfsandstein*) über $E_{dyn} = 14.400$ bis 16.100 N/mm^2 (*Grünsandstein*) bis hin zu $E_{dyn} = 8.117$ bis 11.000 bzw. 12.667 bis 17.000 N/mm^2 (*Kohlesandstein*). Den Ergebnissen entsprechend war im zentrischen Zugversuch von Verbundkörpern aus *Sander Schilfsandstein* und *Rüthener Grünsandstein* ein Adhäsionsversagen im Verbundbereich Mörtel-Stein zu erwarten, während für den *Zwickauer Kohlesandstein* mit Adhäsionsbruch im Stein zu rechnen war.

5 Mörtelsysteme und deren Eigenschaften

5.1 Entwicklung und Verarbeitung der Mörtelsysteme

Schadhafte Mauerwerksfugen werden üblicherweise instand gesetzt, indem der zerrüttete bzw. abgerissene Mörtel bis in eine Tiefe von mehreren Zentimetern ausgeräumt und die gereinigte Fugenstruktur anschließend mit einem geeigneten Verfugmörtel wieder verfüllt wird /2/. Wie aus den vorangegangenen Ausführungen hervorgeht, zeichnet sich ein geeigneter Verfugmörtel für Sanierungen dieser Art im Fall historischen Natursteinmauerwerks neben einer Erfüllung denkmalpflegerischer Belange im wesentlichen durch vier Eigenschaften aus. Dies sind

- die chemisch-mineralogische Verträglichkeit des Verfugmörtels mit im Mauerwerk vorhandenen Stoffen,
- ein guter Haftverbund zwischen Verfugmörtel und Naturstein,
- eine ähnliche Steifigkeit (ähnliche Elastizitätsmoduln) von Mörtel und Stein und
- die Witterungsbeständigkeit des Verfugmörtels /34/.

Die Palette der für die betrachteten Sanierungsaufgaben geeigneten Mörtelsysteme ist durch die Forderung der Verträglichkeit mit den verwendeten Gipsmörteln eingeschränkt. Vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) wurde ein dieser Anforderung entsprechendes Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement (*HGZ*) entwickelt, dessen Erhärtungsmechanismus auf der sulfatisch/basisch angeregten Hydratation des Hüttensands beruht /10/, /12/, /13/, /37/. Die Sulfatbeständigkeit ist in zahlreichen Untersuchungen und Ringversuchen bestätigt worden /31/. Die Unverträglichkeit des *HGZ*-Bindemittels gegenüber Portlandzement konnte in Kauf genommen werden, da zementgebundene Mörtel im aufgehenden Mauerwerk der Sanierungsobjekte nicht oder kaum anzutreffen sind /35/.

Zur Verbesserung von Zugfestigkeit und Zugdehnungsverhalten des Mörtels erfolgte eine Bewehrung mit Ligno-Cellulose-Fasern (LCF) aus Altpapier, wodurch gleichzeitig eine willkommene Reduktion des E-Moduls erreicht wurde /33/, /35/.

Als Verfugmörtel wurden im Rahmen einer *ersten* Prüfkörperserie auf Grundlage der Angaben von *Erbaydar* /11/ verschiedene Varianten des o. g. gipsverträglichen Fasermörtels, ein marktüblicher, nach Herstellerangaben ebenfalls gipsverträglicher, mit Polystyrolkugeln und Bimsstein gemagerter Sanierputz „Re“ und ein üblicher Kalkzementmörtel

„Klobo“ eingesetzt (in Klammern sind die im folgenden zur Unterscheidung gegenüber modifizierten Systemen verwendeten Bezeichnungen angegeben):

- *HGZ*,
- *HGJ* (*HGJ_{um}*),
- *HGQ* (*HGQ_{um}*),
- Sanierputz Re und
- Kalkzementmörtel Klobo.

Die drei Fasermörtel beruhen auf dem Bindemittelsystem Hüttensand - Gips - Zement, wobei jeweils 85 bis 90 % Hüttensand und 5 % Anhydrit verwendet wurden (siehe Tabelle 5.1). Variiert wurde die dritte Komponente: der Zement. Bei der Zementkomponente des *HGZ* handelt es sich um PZ 45 F; für die beiden Mörtelvarianten *HGJ_{um}* und *HGQ_{um}* wurden zwei unterschiedliche Quellzementtypen - einerseits ein Gießereibinder des Typs M der ettringitbildenden Quellzemente mit sehr kurzer Erstarrungszeit, andererseits ein stärker quellender üblicher Quellzement des Typs K - verwendet (siehe Tabelle 5.1). Beide Quellzemente entfalten ihre Eigenschaft der Volumenvergrößerung während des Abbindeprozesses im noch nicht erhärteten Mörtel. Der Kalkzementmörtel *Klobo* besteht aus zwei Raumteilen Kalkhydrat, einem Raumteil PZ 45 F HS Sulfofirm und sechs Raumteilen Sand. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit, des Wasser-Bindemittelwerts und damit des Schwindverhaltens erfolgte im Anschluß an die ersten Untersuchungen im Rahmen einer zweiten Versuchsserie in Ellrich an Prüfkörpern mit den Mörtelsystemen *HGJ_{EL}* und *HGQ_{EL}* eine Modifikation durch Zusatzmittel (siehe Tabelle 5.1):

- Methylcellulose MC 15.000 zur Reduktion der Schwindneigung,
- Mowilith als Haftvermittler zwischen Fugenmörtel und Stein (siehe Abschnitt 4),
- Calciumformiat zur Abbindebeschleunigung und
- Melment F 10 zur Mörtelverflüssigung /33/, /35/.

Analysen an der MPA Braunschweig ergaben für den *Sanierputz Re* eine Zusammensetzung aus Calcit, Quarz, Gips und Anhydrit; Klinkerphasen wurden nicht nachgewiesen /35/. In einer dritten Versuchsserie, wurde ein modifizierter Faserstopfmörtel *HGZ_{RU}* (siehe Tabelle 5.1) eingesetzt, bei dem wegen der porösen Struktur des Travertingesteins auf Zugabe eines Haftvermittlers verzichtet werden konnte.

Tabelle 5.1: Bindemittelsysteme/Zusammensetzung der Faserstopfmörtel /35/

Mörtel- system	Bindemittel				Modifikationen					Wasser
	Hütten- sand	Anhy- drit	Zementkom- ponente		Magerung	Zusatzmittel (bezogen auf das Bindemittel)				w/b
			Art	Anteil	LCF	MC	MO	CaF	Melm.	
					[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]		
HGZ	85,0	10,0	PZ 45 F	5,0	--	--	--	--	--	0,35
HGZ _{RU}			PZ 35 F		5,0	0,25	--	--	1,0	0,35
HGJ _{um}	90,0	5,0	GB	5,0	--	--	--	--	--	0,35
HGJ _{FL}					5,0	0,26	2,5	2,0	1,0	0,35
HGQ _{um}	85,0	10,0	QZ K	5,0	--	--	--	--	--	0,35
HGQ _{FL}					5,0	0,26	2,5	2,0	1,0	0,35

GB = Giebereibinder; QZ K = Quellszement K; MC = Methylcellulose; MO = Mowilith; CaF = Calciumformiat; Melm. = Melment

Die Fasermörtel wurden zur Erzielung einer steifen, knetbaren Konsistenz entsprechend den Angaben von *Sattler* /36/ hergestellt und anschließend zunächst von Hand mit Stopfhammer und Fugenholz, später mit einem preßluftbetriebenen Bildhauerhammer eingebracht. Die Untersuchungen im Rahmen der BMBF-Denkmalpflegeforschung haben zu der Erkenntnis geführt, daß ein Mörtel allein sämtliche oben genannten Anforderungen an einen für Sanierungen geeigneten Verfugmörtel kaum erfüllen kann. Um anfangs beobachteten Flanken- und -abrissen des Verfugmörtels im Kontaktbereich Mörtel-Stein zu begegnen, die durch Zwangsspannungen infolge von Feuchtegradienten auftraten, wurde ein Teil der in *Ellrich* während der zweiten Prüfkörperserie eingesetzten Fasermörtel *HGJ_{FL}* und *HGQ_{FL}* bei der Verfugung mit Deckmörteln versehen. Diese Mörtel dienten (aufgrund ihrer hohen geschlossenen Porosität und ihrer geringen E-Moduln) in erster Linie der rißfreien Abdichtung der Fuge nach außen und wurden zu diesem Zweck in die äußeren 2 cm der Fugentiefe eingebracht. Verwendung fanden der o. g. Sanierputz *Re* und ein Mörtel des Laboratoriums für Bau- und Werkstoffchemie der Gesamthochschule Siegen *Si* auf Hochofenzement/Weißkalkhydratbasis /33/, /35/. Für die Verfugungsuntersuchungen in *Weißensee* kam als Deckmörtel eine speziell entwickelte, durch Bläschieferzuschlag und Beigabe von Luftporenbildner modifizierte Variante des o. g. Fasermörtels HGZ zum Einsatz, die mittels Pigmentierung dem umgebenden Gestein farblich angepaßt wurde /34/.

5.2 Chemisch-mineralogische Eigenschaften der Mörtelsysteme

Die verwendeten Bindemittel wurden einer naßchemischen Analyse unterzogen, deren Ergebnisse im Rahmen des vorliegenden Berichts kurz zusammengefaßt werden /34/, /35/.

Die am Übungsobjekt Walkenried verwendeten Mörtelsysteme *HGZ*, *HGJ_{um}* und *HGQ_{um}* sind sich in ihrer oxidischen Zusammensetzung weitgehend ähnlich. Sie enthalten zwischen 30 und 33 Gew.-% SiO_2 , ca. 42 Gew.-% CaO und ca. 10 Gew.-% Al_2O_3 . Auch der Anteil enthaltener Alkalien Na_2O und K_2O ist bei den drei Mörteln in der Summe mit 0,9 Gew.-% gleich. Deutliche Unterschiede sind jedoch im Sulfatgehalt festzustellen. Er ist bei *HGJ_{um}* mit 3,5 Gew.-% gegenüber *HGZ* mit 6 Gew.-% und *HGQ_{um}* mit 7,2 Gew.-% lediglich etwa halb so groß /35/.

Die Analyse des Sanierputzes Re ergab einen hohen Gehalt an salzsäureunlöslichen, folglich organischen Bestandteilen. Im Vergleich mit den übrigen Mörteln ist ein Al_2O_3 -Gehalt von ca. 15 Gew.-% und ein vergleichsweise niedriger SO_3 -Gehalt von ca. 1,1 Gew.-% vorhanden /35/.

5.3 Physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mörtelsysteme

An der MPA Braunschweig wurden verschiedene Materialparameter der Mörtel ermittelt. Es waren sowohl die Ausgangsstoffe (Bindemittelsysteme) als auch Festmörtelproben Gegenstand der Untersuchungen. An den *Fugenmörtelsystemen* wurden im einzelnen ermittelt:

- Die Reindichte der Bindemittelsysteme mit dem Pyknometerverfahren,
- ihre spezifischen Oberflächen nach *Blaine* und
- ihre Korngrößenverteilungen mittels Siebanalyse.

Darüber hinaus wurden an den Fugenmörtelsystemen und dem *HGZ-Fugendeckmörtel*

- die Biegezugfestigkeiten der Festmörtel nach 28 Tagen,
- ihre Druckfestigkeiten und Rohdichten in Anlehnung an DIN EN 196-1 /9/ und

- ihre dynamischen Elastizitätsmoduln nach dem Verfahren der longitudinalen Schallwelle

untersucht.

Die ermittelten Reindichten der drei *Fugenmörtel* liegen im Bereich um $2,9 \text{ g/cm}^3$, die des Sanierputzes Re mit ca. $2,4 \text{ g/cm}^3$ deutlich darunter. Die spezifischen Oberflächen der Fasermörtel ähneln sich mit 4000 bzw. $3760 \text{ cm}^2/\text{g}$. Die Siebanalyse ergab für die Fasermörtel erheblich höhere Feinkornanteile als beim Sanierputz Re. Dies ist auf die werkseitige Magerung des Sanierputzes mit Polystyrolkugeln und Bimsstein zurückzuführen, die vor der Siebanalyse nicht abgetrennt werden konnte /35/.

Festigkeitsuntersuchungen und E-Modulbestimmung im Alter von 28 Tagen an Fugenmörteln in **Walkenried und Ellrich** erfolgten zum Vergleich mit LC-Faser-Magerung bzw. an Sanierputz Re sowie an solchen mit Normsandmagerung /10/, /12/, /13/. Rohdichten ($\rho_{M\ddot{o}} = 1,69$ bis $1,82 \text{ g/cm}^3$) und dynamischen E-Moduln ($E_{dyn, M\ddot{o}} = 14.920$ bis 16.347 N/mm^2) der Fasermörtel sind infolge der LCF-Bestandteile niedriger als die der normsandgemagerten Mörtel. Der dynamische E-Modul des polystyrolhaltigen Sanierputzes Re liegt mit 2730 N/mm^2 noch darunter. Entsprechend gering fallen die Druck- und Biegezugfestigkeitswerte des Sanierputzes aus: Die Druckfestigkeit liegt mit $\beta_{D, M\ddot{o}} = 4,07 \text{ N/mm}^2$ gar im für den Einsatz als Fugenmörtel bedenklichen Bereich /35/. Die Druckfestigkeiten der Faserstopfmörtel hingegen sind mit $\beta_{D, M\ddot{o}} = 39,9$ bis $47,7 \text{ N/mm}^2$ unbedenklich. Die Bandbreite der Biegezugfestigkeiten liegt bei $\beta_{BZ, M\ddot{o}} = 3,32$ bis $3,57 \text{ N/mm}^2$ /33/, /35/. Bei Prüfung der Mörtelsysteme für die **Runneburg** ergaben sich im Alter von 28 Tagen folgende Materialkennwerte (in Klammern sind die Werte für den verwendeten *HGZ-Fugendeckmörtel* nach 33 Tagen angegeben): Rohdichte $\rho_{M\ddot{o}} = 1,819$ ($1,478$) g/cm^3 , ein dynamischer E-Modul $E_{dyn, M\ddot{o}} = 18.860$ (6200) N/mm^2 , eine Druckfestigkeit $\beta_{D, M\ddot{o}} = 36,35$ ($4,93$) N/mm^2 und eine Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ, M\ddot{o}} = 6,63 \text{ N/mm}^2$ (im Fall des Deckmörtels nicht untersucht). Zusätzlich wurde eine Zugfestigkeit $\beta_{Z, M\ddot{o}} = 1,83 \text{ N/mm}^2$ ($0,62$) ermittelt /34/.

6 Untersuchte Prüfkörper

6.1 Grundsätzliches

Wie die bisherigen Ausführungen zeigen, ist es erforderlich, die individuellen Bedingungen des zu sanierenden Bauwerks in die Mörtelbeurteilung und -wahl einzubeziehen. Eignungsversuche konnten im Fall der hier beschriebenen Untersuchungen nur teilweise am Bauwerk vorgenommen werden (siehe Abschnitt 5). Deshalb wurden wichtige Gesteins- und Mauerwerksparameter mittels Prüfverfahren abgebildet, die an der MPA Braunschweig entwickelt wurden /2/. Die verwendeten Prüfkörper/-verfahren werden nachfolgend vorgestellt.

6.2 Zugrundegelegtes Verbundmodell

Eine dauerhafte Verfugung muß weitgehend rißfrei bleiben (siehe Abschnitt 1). Dies erfordert einen guten Haftverbund zwischen Fugenmörtel und Mauerstein /35/. Lagerfugen von Werksteinmauerwerk erfahren infolge vertikaler Mauerwerksbelastung i. d. R. dreiachsige Mörteldruckspannungen. Dagegen werden die Stoßfugen durch die Lasteinwirkung vergleichsweise gering beansprucht /2/. Entsprechend der Porenstruktur und Witterungseinwirkung stellen sich zusätzlich Feuchte- und Temperaturgradienten ein, die thermische und hygrische Verformungen des erhärtenden oder bereits erhärteten Mörtels zur Folge haben (siehe Bild 6.1) /35/.

Verformungen ε in senkrechter Richtung infolge Einwirkungen wie beispielsweise Last, Temperatur oder Feuchte werden durch die Flanken der dem Lastabtrag dienenden und demzufolge unter Spannung stehenden Mauersteine behindert - es entstehen horizontale Zwangspannungen σ_{ZW} . In Fugenlängsrichtung kommt es durch inneren Zwang zu Eigenspannungen σ_E . Beide Spannungsarten sind ort- und zeitabhängig und unterliegen dem Effekt der Spannungsrelaxation /35/.

Der Mauerwerksverband setzt den Einwirkungen S aus thermischen und hygrischen Einflüssen den Widerstand R in Form des Haftverbunds entgegen. Die Widerstandsgröße wird charakterisiert durch

- die Zugfestigkeit $\beta_{z, S}$ der Steine,

- die Druckfestigkeit $\beta_{D, Mö}$ des Mörtels und
- die Haftzugfestigkeit β_{HZ} zwischen Mörtel und Stein,

wobei der geringste Wert den Widerstand R des Mauerwerks maßgebend beeinflusst. Wie die Einwirkungen S ist auch die Widerstandsfähigkeit R des Mauerwerks orts- und zeitabhängig. Überschreiten die Einwirkungen das ertragbare Maß ($S > R$), so kommt es zur Rißbildung. Dabei führen Zwangsspannungen zu Flankenabrissen, während sich Eigenspannungen durch Bildung von Querrissen im Mörtel abbauen /35/.

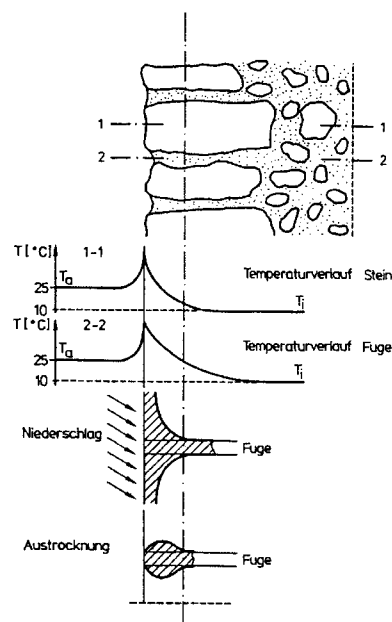


Bild 6.1: Temperatur- und Feuchtegradient im Mauerwerk /35/

6.3 Zweistein-Prüfkörper

Der „Zweisteinkörper“ wurde als einfacher Verbundprüfkörper für Vorversuche zur Optimierung der in Abschnitt 5 beschriebenen Fasermörtel verwendet /35/. Dadurch konnten in Frage kommende Mörtelrezepturen deutlich praxisnäher als mittels Prüfung von Mörtelprismen nach DIN 18555 vergleichend beurteilt werden /2/. Außerdem konnten auf diese Weise Materialkennwerte des jungen Mörtel-Steinverbunds ohne Witterungsbeeinflussung für spätere Vergleiche mit bewitterten Prüfkörpern ermittelt werden. Die Herstellung erfolgte nach /2/ in geeigneten Stahlformen, in denen je zwei Natursteinwürfel der Kantenlänge 10 cm mit einer 2 cm dicken Mörtelfuge zum Verbundkörper ergänzt wurden (siehe Bild 6.2).

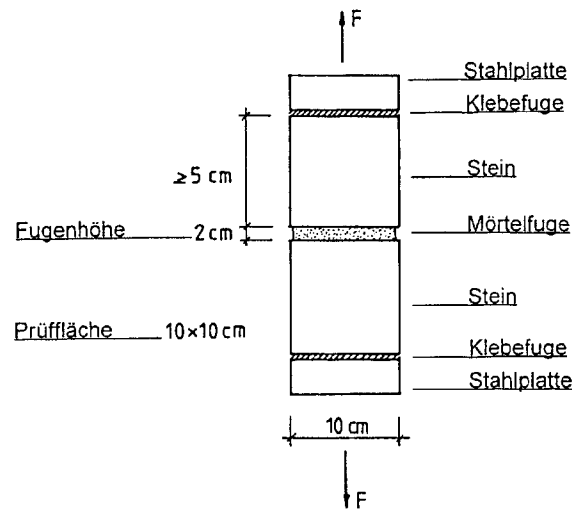


Bild 6.2: Zweisteinkörper, schematisch /35/

6.4 Drei- und Vierstein-Prüfkörper

Der sog. **Dreistein-Prüfkörper** stellt ein in der BMBF-Denkmalpflegeforschung an der MPA Braunschweig entwickeltes Verfahren dar, um zum Zweck der Mörteloptimierung die Bewitterungssituation für Verfugmörtel in einem Mauerwerksausschnitt langfristig zu simulieren /1/. Für die im Rahmen des vorliegenden Berichts beschriebenen Untersuchungen wurden drei Steinquader der Maße (l x b x h) 30 x 15 x 15 cm³ verwendet, die mit Hilfe eines stählernen Rahmens und von Abstandhaltern so fixiert wurden, daß zwei Fugen von je 2 cm Höhe entstanden (siehe Bild 6.3 und Bild 6.5). Anschließend wurde das jeweilige Mörtelsystem in die durch eingelegte Leisten gebildeten Fugenspalten eingebracht /2/, /35/.

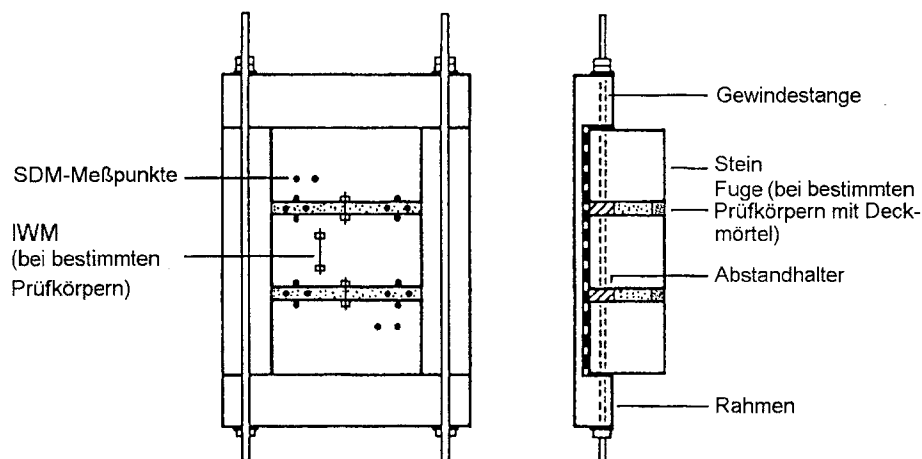


Bild 6.3: Dreisteinkörper, schematisch /35/



Bild 6.4: Abgedeckte Dreisteinkörper in Ellrich /1/

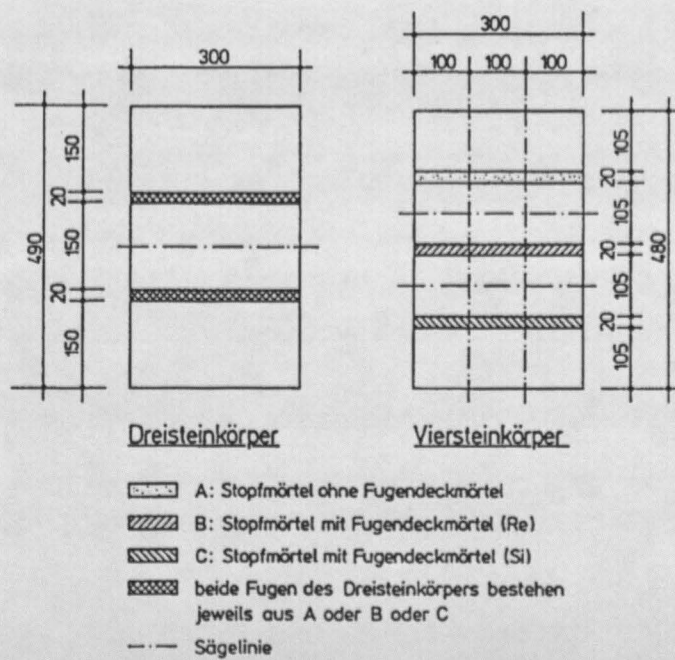


Bild 6.5: Viersteinkörper, schematisch, Gegenüberstellung mit Dreisteinkörper der ersten/zweiten Serie /35/

Um die im Bauwerk vorhandenen Zwängungen im rückwärtigen Mauerwerk nachzustellen, wurde eine Zugstangenkonstruktion gewählt. Auf die Spannvorrichtungen des Rahmens wurde ein Drehmoment von 30 Nm aufgebracht, das zur Aufrechterhaltung einer etwa konstanten Auflast der Steine korrigiert werden konnte. Nach dem Verfugen schloß sich eine vierzehntägige Nachbehandlungsphase mit feuchten Tüchern und Folien an, um die Verdunstung von Feuchtigkeit in der ersten Hydratationsphase herabzusetzen. Nach einer seitlichen Versiegelung der Dreisteinkörper wurden Induktive Wegaufnehmer und/oder Setzdehnungsmeßstrecken instrumentiert, um die Verformungen von Stein und Mörtel infolge der Witterungseinflüsse erfassen zu können. Zum Schutz vor Niederschlagseintrag wurden seitlich und oben Schutzbleche angebracht (siehe Bild 6.4) /1/, /35/.

Neben Dreisteinkörpern wurden im Rahmen von Mörteloptimierungen sog. **Viersteinkörper** verwendet (siehe Bild 6.5), mit deren Hilfe es anhand gestaffelter Festigkeitsuntersuchungen möglich sein sollte, die zeitliche Entwicklung der Verbundqualität zu überprüfen. Die Prüfkörper bestanden aus vier Steinquadern mit den Abmessungen (l x b x h) 30 x 15 x 11 cm³ und drei Lagerfugen. Die den Verhältnissen im natürlichen Mauerwerk entsprechenden Zwängungen wurde wie bei Dreisteinkörpern über Zugstangen erzeugt.

7 Meßprogramme

7.1 Allgemeines

Nach den oben beschriebenen Vorversuchen an Zweisteinkörpern folgten Untersuchungen an frei bewitterten Prüfkörpern und solchen unter künstlichem Klima sowie In-situ-Versuche an Musterflächen. Grundidee war es, Verformungsmeßergebnisse bei gleichzeitiger Messung der für die Verbundqualität wichtigen thermischen und hygrischen Klimadaten zu erhalten /1/. Ergänzend erfolgten regelmäßig Rißbildaufnahmen. Die Ergebnisse sollten hinsichtlich ihrer Plausibilität qualitativ und quantitativ vergleichbar sein und neben der Entwicklung eines Saniermörtels der Beurteilung eingesetzter Meßverfahren und Prüfkörper dienen /35/.

Der überwiegende Teil der durchgeführten Forschungen fand bei individuell unterschiedlicher Dauer im Zeitraum von Mai 1992 bis Januar 1997 statt. Lediglich ein Teil der Untersuchungen am Sanierungsobjekt Runneburg dauert bis heute an. Zunächst wurden ab Mai 1992 Prüfkörper an der MPA Braunschweig (Freibewitterung und Klimakammerbetrachtung) und im Freibewitterungsversuch in Walkenried untersucht. Dort wurde im Juli 1992 eine erste Übungsfläche angelegt, später (ab Oktober 1993 bzw. September 1994) folgten in Ellrich und Weißensee ergänzend Prüfkörper und (ab September 1994 bzw. Oktober 1995) Musterflächen.

Die **freie Bewitterung** wurde gewählt, da sie die Erprobung der Einflüsse natürlicher Wetterzyklen auf das Untersuchungsobjekt ermöglicht. Eine aussagekräftige Versuchsreihe erfordert hierbei lange Bewitterungs- und Untersuchungszeiträume von mindestens einem, besser zwei Jahreszyklen.

Natürliche Wetterzyklen lassen sich aufgrund ihrer Komplexität durch **künstliche Bewitterung** in der Klimakammer nur unter erheblichem Aufwand simulieren. Deshalb wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen mittels Steuerung der klimatischen Bedingungen eine Reduzierung der Klimaeinflüsse auf wenige, maßgebende Größen möglich war. Dadurch konnte die Wirkung einzelner Witterungseinflüsse ohne Einwirkung von Störgrößen untersucht werden /35/.

7.2 Meß- und Auswertungstechnik

7.2.1 Setz-Dehnungsmessung

Die Setzdehnungsmessung ist ein elektrisches Längenmeßverfahren, das zur Erfassung absoluter Längen die Messung der Änderung des elektrischen Widerstands nutzt. Das Gerät (siehe Bild 7.1) nimmt die Meßlänge mechanisch-berührend auf und wandelt sie mittels integrierter Dehnungsmeßstreifen in eine verhältnismäßige elektrische Spannung um, die elektronisch verstärkt und registriert werden kann. Längenänderungen können entweder absolut aus der Spannungsabweichung vom elektrischen Nullpunkt oder relativ aus der Differenzspannung zur vorangegangenen Messung berechnet werden /1/, /18/.

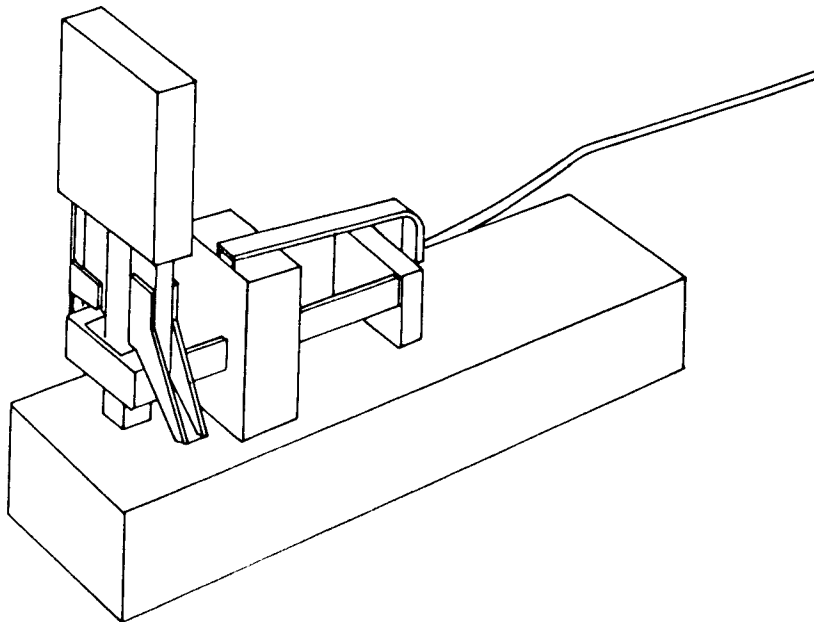


Bild 7.1: Setzdehnungsaufnehmer mit Eichstab (Schemaskizze)

Der Setzdehnungsaufnehmer ist besonders für die langfristige Überwachung von Bauteilen geeignet, wenn - wie im Fall der im Rahmen des vorliegenden Berichts beschriebenen Untersuchungen - das Gerät lediglich zur Zeit der Messung an das Bauteil angesetzt, zwischen den Messungen jedoch vom Meßobjekt abgenommen werden soll. Dazu ist das Gerät mit Spezialfüßen versehen, die ein zentrisches Aufsetzen auf am Prüfkörper angebrachte Meßpunkte in Form von mit Stahlkugeln bestückten Messingscheiben ermöglichen /1/.

7.2.2 Induktive Wegaufnahme

Die Induktive Wegaufnahme ist ein Längenmeßverfahren, das zur Erfassung absoluter Meßgrößen die Messung der Änderung der elektrischen Induktivität nutzt. Die aufgenommene Meßlänge wird dabei in eine umgekehrt proportionale elektrische Spannung umgewandelt, die elektronisch verstärkt und anschließend registriert werden kann. Das Verfahren eignet sich besonders zur quasi-kontinuierlichen Aufzeichnung von Verformungsänderungen. Dazu ist für jede zu untersuchende Meßstrecke ein gesonderter Wegaufnehmer erforderlich, der fest mit dem Meßobjekt verbunden wird und während des gesamten Beobachtungszeitraums dort verbleibt. In Bild 7.2 ist ein Induktiver Wegaufnehmer dargestellt.

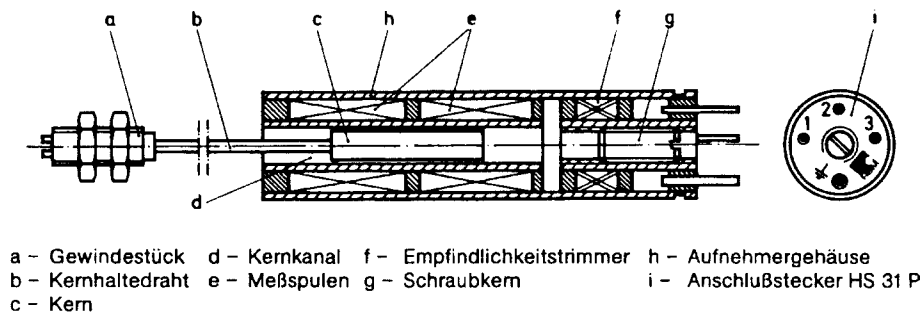


Bild 7.2: Induktiver Wegaufnehmer, schematisch /17/

Ein nachgeschalteter „Datenlogger“ ermöglicht die Speicherung der Meßergebnisse. Das speichernde Gerät kann auf die Erfassung jeweils selbsttätig über vorgewählte Zeitintervalle eingestellt werden. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität des Datenloggers ist eine regelmäßige Übertragung der aufgezeichneten Daten auf einen gesonderten Rechner erforderlich. Zum Zweck der Auswertung können die gespeicherten Spannungsänderungen in Längenänderungen umgerechnet und grafisch aufbereitet werden/1/.

7.2.3 Aufzeichnung thermischer und hygrischer Daten

Bei Versuchen unter freier Bewitterung erfolgte begleitend eine Erfassung der thermischen und hygrischen Klimadaten: relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Sonnenenergieintensität, Niederschlagshöhe, Schlagregenintensität und Steintemperatur am Mauerwerk. Zu diesem Zweck wurde eine Klimastation mit externen elektronischen Fühlern/Meßgeräten ver-

wendet, deren Meßwerte während des gesamten Versuchszeitraums periodisch von einem nachgeschalteten Datenlogger gespeichert wurden /1/.

7.3 Untersuchungen an der Materialprüfanstalt Braunschweig

7.3.1 Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen wurden ausgewählte physikalisch-mechanische Kennwerte der verwendeten Stein-Mörtelkombinationen ermittelt, um erste Anhaltspunkte für die Mörteloptimierung zu erhalten und Vergleichswerte für Gegenüberstellungen mit im Anschluß an die Bewitterung ermittelten Kennwerten zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden Zweisteinkörperserien geringen Umfangs mit 28 Tage alten Ver fugungen untersucht. Folgende Kennwerte wurden ermittelt:

- die Haftzugfestigkeit des Mörtel-Steinverbunds,
- das Bruchbild des Verbundbereichs Mörtel-Stein und
- die Haftzugfestigkeit des Gesteingefüges.

Um eine quantitative Gegenüberstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, erfolgten Herstellung, vierzehntägige Nachbehandlung, Lagerung und Versuchsdurchführungen unter künstlich klimatisierten Verhältnissen bei 20 °C und 65 % r. F. Zur Ermittlung der **Haftzugfestigkeiten des Mörtel-Steinverbunds** im weggeregelten, zentrischen Zugversuch wurden Stahlplatten auf die von der Fuge abgewandten Steinflächen geklebt (siehe Bild 6.2). Neben Haftzugfestigkeiten konnten anhand visueller Analysen des **Bruchbilds** Aussagen über die Feuchteverteilung in der Fuge und die Bruchart gemacht werden. Die Travertinprüfkörper versagten alle durch Kohäsionsbruch im Stein, während an den untersuchten Dolomit- und Sandsteinprüfkörpern häufig komplizierte Mischbruchbilder infolge Kohäsions- und Adhäsionsversagen beobachtet wurden. Die **Haftzugfestigkeit der Gesteinsgefüge** wurde nach DIN 18555, Teil 6 /4/ ermittelt. Darüber hinaus wurden für Fälle ausbleibenden Verbunds zur Erforschung der Ursachen Dünnschliffe angefertigt und auf mikroskopisch kleine an der Steinflanke haftende Mörtelreste hin untersucht /34/, /35/.

7.3.2 Klimakammerversuche

Von April/Mai 1992 an erfolgten Klimakammeruntersuchungen an Dreistein-Verbundprüfkörpern aus *Harzer Dolomit*, *Sander Schilfsandstein*, *Rüthener Grünsandstein* und *Zwickauer Kohlesandstein* bei konstant 20 °C und wöchentlich zyklisch wechselnder relativer Luftfeuchte von 85 % bzw. 35 %. Während des Untersuchungszeitraums, der je nach Gesteinsart im Juli/August/September 1992 endete, wurde zweimal Niederschlag simuliert /35/. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick des Versuchsprogramms.

Tabelle 7.1: Klimakammeruntersuchungen, Versuchsprogramm Dreisteinkörper /35/

Auslagerungszeitpunkt	Natursteinart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
April/Mai 1992	Sander - Schilfsandstein	HGZ	S 1, S 2	11.09.1992
		HGJ _{um}	S 3, S 4	
	Rüthener Grünsandstein	HGZ	G 1, G 2	11.09.1992
		HGJ _{um}	G 3, G 4	
	Zwickauer Kohlesandstein	HGZ	K 1, K 2	11.09.1992
	Harzer Dolomit	HGZ	D 1, D 2	27.08.1992
		HGJ _{um}	D 3, D 4	29.07.1992
		Sanierputz Re	D 5, D 6	30.07.1992

Verformungen wurden mittels Setzdehnungsmessungen an zwölf Meßstrecken erfaßt (siehe S. A1). Nach der Herstellung der Dreisteinkörper mußte zunächst eine Mörtelabbindezeit von einem Tag abgewartet werden, bis die Mörtelkonsistenz auch die Anbringung der horizontalen Meßpunkte auf den Fugen erlaubte (siehe Bild 7.3) /1/.

Lageänderungen und Eigenverformungen der Meßpunkte infolge thermischer Einwirkungen waren nicht zu erwarten. Vor dem Einsatz wurde das Setz-Dehnungsmeßgerät im Labor kalibriert. Die Ergebniswerte wurden am nachgeschalteten Meßverstärker abgelesen und von Hand protokolliert. Die Berechnung von Längenänderungen anhand gemessener Meßpunktabstände erfolgte nach dem bereits beschriebenen Prinzip der Ermittlung von Differenzspannungen /1/.

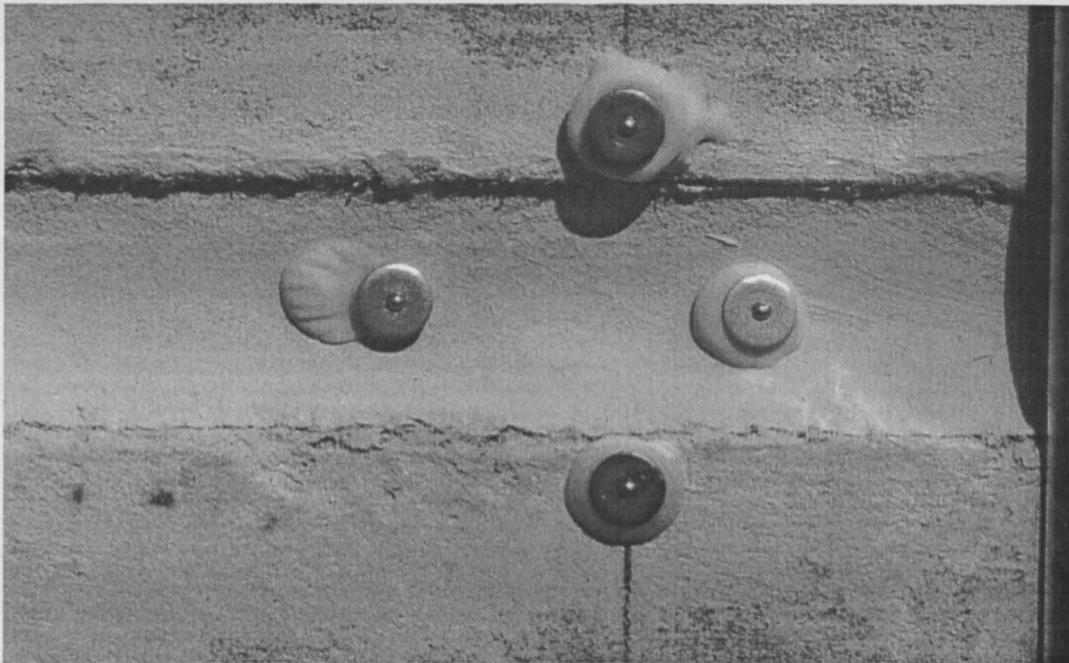


Bild 7.3: Setzdehnungsmeßpunkte am Prüfkörper /1/

7.3.3 Freibewitterungsversuche

Parallel zu den o. g. Klimakammerversuchen wurde im Mai 1992 eine Serie von sechs leicht geneigten Dreisteinkörpern aus Dolomit sowie je vier Dreisteinkörpern aus Sander Schilfsandstein und Rüthener Grünsandstein unter freier Bewitterung aufgestellt und teils bis März, teils bis Juni 1996 untersucht (siehe Tabelle 7.2). Zu diesem Zweck wurden an den Prüfkörpern je zwölf *Setzdehnungsmeßstrecken* angebracht (siehe S. A5) und die eintretenden Verformungsänderungen regelmäßig protokolliert (siehe Abschnitt 7.3.2).

Zusätzlich wurden an den Prüfkörpern S5, S 8, G 6, G 7, D 7, D 9 und D 11 je zwei Meßstrecken vertikal über der Fuge und eine Meßstrecke vertikal auf dem mittleren Stein mit *Induktiven Wegaufnehmern* bestückt (siehe S. A5). Bevor die Dreisteinkörper nach der Verfüguung mit Induktiven Wegaufnehmern versehen werden konnten, mußte die 12tägige Mörtel-Nachbehandlungszeit abgewartet werden. Von einer früheren Anbringung der Meßgeräte wurde abgesehen, da eine Verklebung auf dem künstlich feuchtgehaltenen Mauerwerk nicht möglich war. Die Montage der Wegaufnehmer erfolgte mit Hilfe von Aluminiumsockeln, die mit Zweikomponentenkleber über den Meßstrecken befestigt wurden (siehe Bild 7.4 und Bild 7.5). Da der Wärmeausdehnungskoeffizient der Sockelkon-

struktion Einfluß auf die Meßergebnisse hatte, wurde zum Zweck der rechnerischen Meßwertkorrektur im Labor das thermische Verhalten der Meßsysteme untersucht und individuelle Korrekturfaktoren ermittelt /1/, /17/.

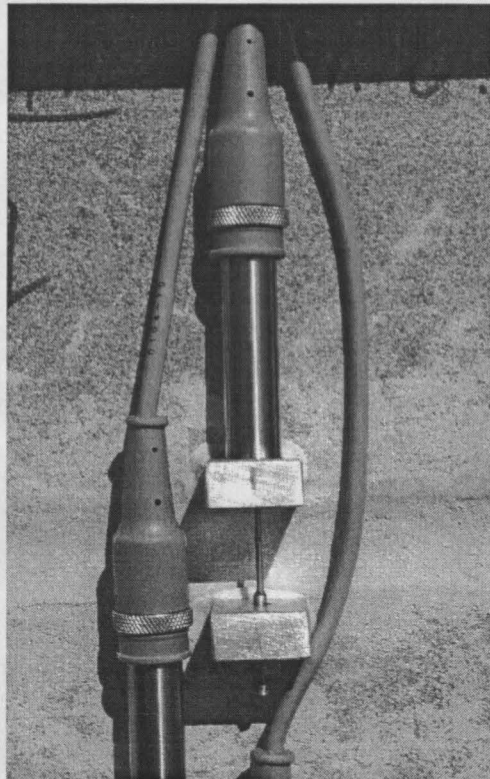


Bild 7.4: Induktive Wegaufnehmer /1/

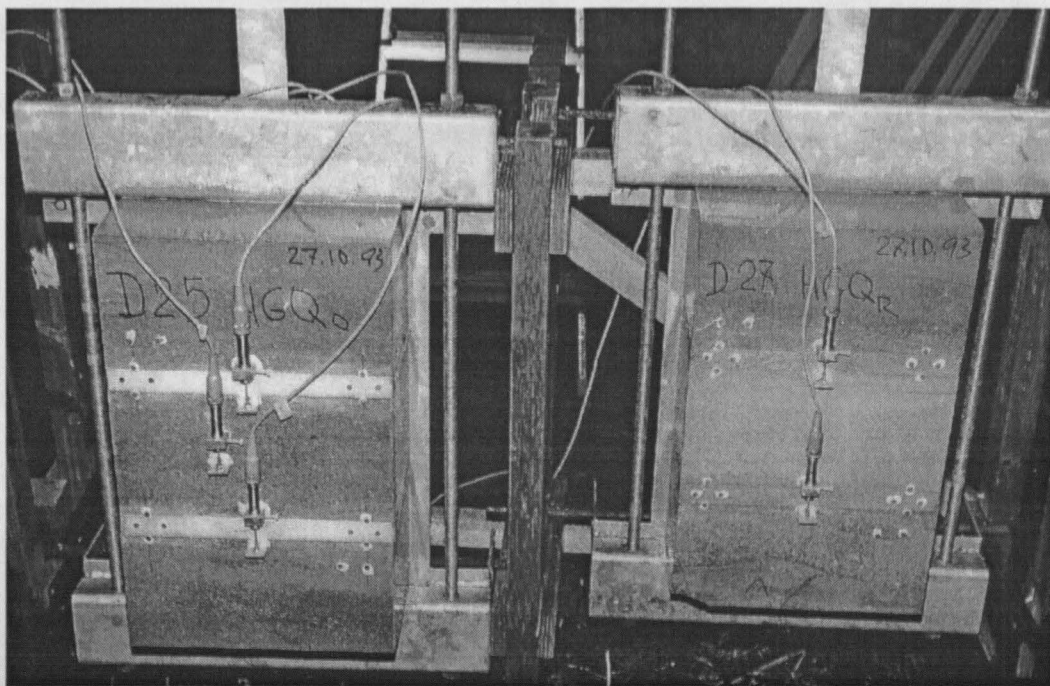


Bild 7.5: Instrumentierung Induktiver Wegaufnehmer /1/

Zur Erprobung einer Abwandlung der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Zwängungskonstruktion wurden im Januar 1995 ergänzend zu Freibewitterungsversuchen an der Runneburg in Weißensee (siehe Abschnitt 7.6.1) an der MPA Braunschweig zwei Dreisteinkörper aus Travertin hergestellt und ausgelagert (siehe Tabelle 7.2). Dabei wurde jeweils die obere Fuge ohne Deckmörtel, die untere Fuge mit Deckmörtel ausgeführt /34/.

Tabelle 7.2: Freibewitterungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig, Versuchsprogramm Dreisteinkörper /34/, /35/

Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Gesteinsart	Fugenmörtel	Prüfkörper	Abbau
Juli 1992	Freibewitterung MPA Braunschweig	Sander	HGZ	S 5, S 6	21.03.1996
		Schilfsandst.	HGJ _{um}	S 7, S 8	
		Rüthener	HGZ	G 5, G 6	
		Grünsandst.	HGJ _{um}	G 7, G 8	
		Harzer Dolomit	HGZ	D 7, D 8	11.06.1993
			HGJ _{um}	D 9, D 10	
			Sanierputz Re	D 11, D 12	
Januar 1995	Freibewitterung MPA Braunschweig	Travertin	HGJ _{EL,R/0}	T 7	Januar 1997
			HGZ _{RU,R/0}	T 8	

Sander Schilfsandst. = Sander Schilfsandstein; Rüthener Grünsandst. = Rüthener Grünsandstein

7.4 Untersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried

7.4.1 Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern

Im Juni 1992 wurde in Walkenried eine Serie von sechs geneigten Dreisteinkörpern aus Dolomit unter freier Bewitterung aufgestellt und bis Juni 1993 untersucht. Dazu wurden Setzdehnungsmessungen und Induktive Wegaufnahmen durchgeführt (siehe hierzu Abschnitte 7.3.2 und 7.3.3). Setzdehnungsaufnahmen wurden an allen ausgelagerten Prüfkörpern durchgeführt, während Induktive Wegmessungen lediglich an den Prüfkörpern D 13, D 15 und D 17 erfolgten (siehe S. A9). Tabelle 7.3 zeigt das Versuchsprogramm.

Tabelle 7.3: Freibewitterungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried, Versuchsprogramm Dreisteinkörper /35/

Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
16.06.1992	Freibewitterung Walkenried	HGZ	D 13, D 14	07.06.1993
		HGJ _{um}	D 15, D 16	
		Sanierputz Re	D 17, D 18	

7.4.2 Musterflächenuntersuchungen

Zur Erprobung der modifizierten Faserstopfmörtel am Bauwerk wurde im Juli 1992 die östliche Giebelwand mit einer Gesamtfläche von ca. 15 m² als Übungsobjekt angelegt (siehe Bild 7.6). Dabei wurden Teilflächen mit verschiedenen Mörtelsystemen hergestellt: ca. 8 m² mit HGZ-, ca. 2,6 m² mit HGQ_{um}-Mörtel, ca. 3,0 m² mit Sanierputz Re, ca. 2,9 m² mit Klobo- und ca. 2,4 m² mit HGJ_{um}-Mörtel. Die Fugen wurden zunächst händisch ausgeräumt und anschließend mit Wasser drucklos ausgespült.

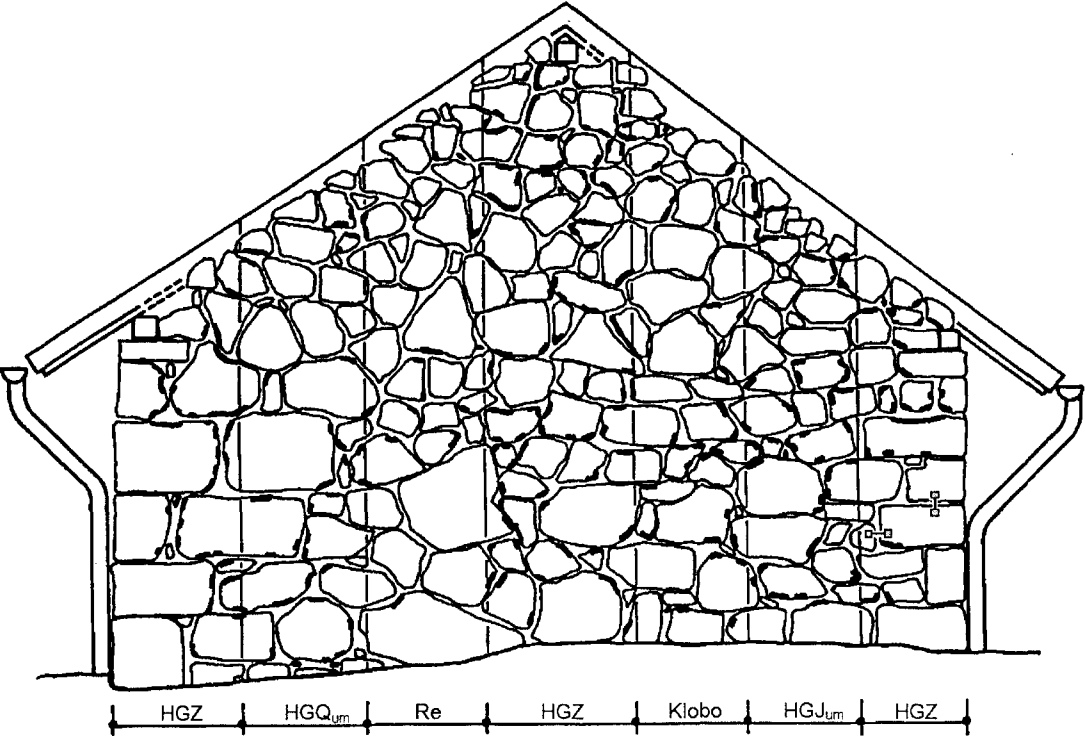


Bild 7.6: Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried, Übungsobjekt mit Meßstrecken, schematisch /35/

Nach Vornässung erfolgte der Einbau des Fasermörtels mittels Bildhauerhammer und Klüpfel. Hieran schloß sich eine siebentägige Nachbehandlung der Musterfläche mit feucht gehaltenen Jutebahnen und Folien zum Schutz vor Austrocknung an.

Nach Abschluß der Mörtelnachbehandlung erfolgten vom 15.07.1992 bis Oktober 1993 Induktive Wegmessungen an zwei Meßstrecken (siehe S. A11).

7.5 Untersuchungen an der Kirche St. Johannis Ellrich

7.5.1 Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern

Im Oktober 1993 wurden zur weiteren Erprobung modifizierter Mörtel zwei unterschiedliche Arten von Prüfkörpern ausgelagert (siehe Tabelle 7.4): Zwölf *Dreistein-Prüfkörper* und acht *Viersteinkörper* aus Dolomit mit *HGJ*- und *HGQ*-Mörteln, die teilweise Deckmörtel erhielten. Auf eine gegen die Vertikale geneigte Aufstellung wurde verzichtet. Als Auslagerungsort wurde die Südseite der Kirche St. Johannis gewählt.

Der überwiegende Teil der Untersuchungen an der Serie von *Dreisteinkörpern* wurde bis August 1994 untersucht und anschließend abgebaut - stehen blieben lediglich D 19 und D 21, an denen die Messungen bis September 1996 fortgeführt wurden. An jedem Prüfkörper wurden 12 *Setzdehnungsmeßstrecken* gemessen (siehe S. A13). Induktive Wegaufnehmer zur vertikalen Bewegungsmessung über die Fugen hinweg wurden an den Prüfkörpern D 19, D 21, D 23, D 25, D 27 und D 29 angebracht. Ergänzend erhielten die Prüfkörper D 23 und D 25 vertikale Meßstrecken am mittleren Stein.

Die erste Setz-Dehnungs-Ablesung erfolgte am 28.10.1993. Wegen der zu erwartenden großen Anfangsverformungen während der Nachbehandlungsphase und der anschließenden ersten Wochen freier Bewitterung folgten die weiteren Messungen im Abstand von 2 bis 14 Tagen. Ab Dezember 1993 wurde die Zeitspanne zwischen den Längenmessungen auf ca. vier Wochen verlängert.

Aufgrund der Mörtelnachbehandlung konnte mit den Aufzeichnungen der Induktiven Wegaufnehmer erst am 09.11.1993 begonnen werden, zwölf Tage nach der ersten Setzdehnungsmessung /1/.

Tabelle 7.4: Freibewitterungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis Ellrich, Versuchsprogramm Dreisteinkörper /1/, /33/, /35/

Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
28.10.1993	Freibewitterung Ellrich	HGJ _{EL,0}	D 19, D 20	27.09.96 /
		HGJ _{EL,R}	D 21, D 22	03.08.94
		HGJ _{EL,S}	D 23, D 24	03.08.94
		HGQ _{EL,0}	D 25, D 26	03.08.94
		HGQ _{EL,R}	D 27, D 28	
		HGQ _{EL,S}	D 29, D 30	

Die Verformungsuntersuchungen an *Viersteinkörpern* (D 33, D 34 und D 38, siehe Tabelle 7.5) erfolgten größtenteils im Zeitraum von Oktober 1993 bis April 1994, lediglich zwei Prüfkörper (D 33 und D 37) blieben darüber hinaus bis September 1996 bzw. August 1994 stehen. An jedem Prüfkörper wurden 16 *Setzdehnungsmeßstrecken* gemessen (siehe S. A19).

Tabelle 7.5: Freibewitterungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis Ellrich, Versuchsprogramm Viersteinkörper /35/

Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau-/Prüftermin
28.10.1993	Freibewitterung Ellrich	HGJ _{EL,0,R,S}	D 31	20.01.94
			D 32	25.11.94
			D 33	27.09.96
			D 34	17.05.94
		HGQ _{EL,0,R,S}	D 35	20.01.94
			D 36	25.11.94
			D 37	03.08.94
			D 38	17.05.94

Die drei Fugen der Bewitterungskörper wurden unter Zugrundelegung der in Tabelle 7.5 angegebenen Faserstopfmörtelarten jeweils unterschiedlich aufgebaut (siehe Bild 6.5): Die

oberen Fugen wurden bis zur Vorderkante homogen mit dem jeweiligen Stopfmörtel verfügt, die mittleren und die unteren Fugen erhielten eine 2 cm dicke Fugendeckmörtelschicht aus Sanierputz Re bzw. Mörtel Si.

7.5.2 Musterflächenuntersuchungen

Die o. g. Untersuchungen mit modifizierten Faserstopfmörteln ergaben für die untersuchte Sanierungsaufgabe eine besondere Eignung der Kombination Mörtelsystem *HGJ_{EL}*/Deckmörtel Re. Zur weiteren Erprobung wurde im September 1994 eine Musterfläche im Giebel des nördlichen Querhauses angelegt (siehe Bild 7.7 und Bild 7.8). Zunächst wurden die Fugen in eine Tiefe von mindestens 2 cm mittels Trennschleifer von lockerem Mörtelmaterial befreit und ausgeblasen. Nach einer Kartierung der erzeugten Fugentiefen und Vornässung erfolgte der Einbau des chargenweise hergestellten Fasermörtels mit einem preßluftbetriebenen Bildhauerhammer, wobei die äußeren 1,5 bis 2 cm der Fugentiefe freigehalten wurden. Der verbleibende Raum wurde nach eintägigem Abklingen der ersten Hydratationsphase des Fasermörtels bei Nachbehandlung mit befeuchteten Jutebahnen und Folie mit Deckmörtel Re mittels Fugenkelle verfügt. Anschließend erfolgte eine zweiwöchige Nachbehandlung der Musterfläche /35/. Nach Beendigung der Mörtelnachbehandlung erfolgte die Instrumentierung von acht Induktiven Wegaufnehmern (siehe S. A25). Die Wegmessungen erfolgten bis Januar 1997.



Bild 7.7: St. Johannis Ellrich, eingerüstete Musterfläche /35/

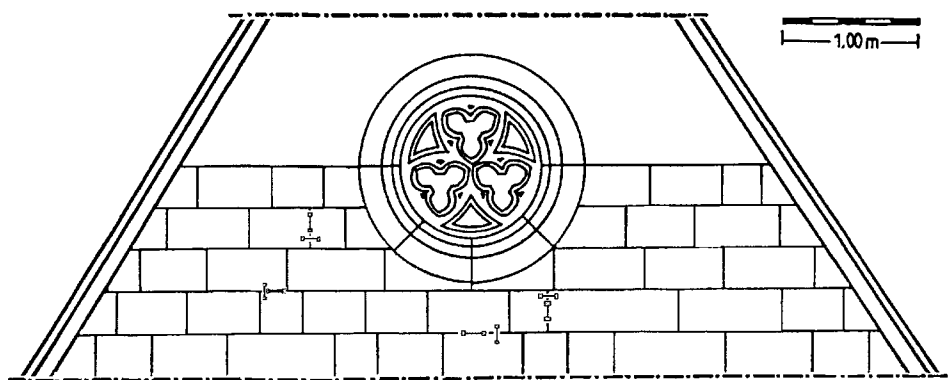


Bild 7.8: St. Johannis Ellrich, Musterfläche Meßstrecken, schematisch /35/

7.6 Untersuchungen an der Runneburg Weißensee

7.6.1 Verbund-/Verformungsuntersuchungen an Prüfkörpern

Im September 1994 wurden zur Erprobung des in Abschnitt 5 vorgestellten modifizierten Mörtels HGZ_{RU} sechs *Dreisteinprüfkörper* aus Travertin, teilweise mit, teilweise ohne Fugendeckmörtel, ausgelagert (siehe Tabelle 7.6). Da der speziell für die Anwendung in Weißensee entwickelte HGZ -Fugendeckmörtel zum Zeitpunkt der Prüfkörperaufstellung noch nicht anwendungsreif war, wurde auf den bereits in Ellrich verwendeten Sanierputz Re zurückgegriffen. Als Aufstellungsort wurde die Westseite des zum „Fürstenhaus“ gehörigen Querhauses gewählt, wobei die Prüfkörper zur Erzielung von mit den Ergebnissen der Mustersverfugung an der Palassüdwand (siehe Abschnitt 7.6.2) vergleichbaren Werten senkrecht gestellt und nach Süden ausgerichtet wurden.

Tabelle 7.6: Freibewitterungsuntersuchungen an der Runneburg in Weißensee, Versuchsprogramm Dreisteinkörper /34/

Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
27./28.09.1994	Freibewitterung Weißensee	$HGJ_{EL,0}$	T 1, T 2	Oktober 1996
		$HGJ_{EL,R}$	T 3, T 4	
		$HGZ_{RU,R}$	T 5	
		$HGZ_{RU,0}$	T 6	

An jedem Prüfkörper wurden 16 *Setzdehnungsmeßstrecken* gemessen (siehe S. A28). An einem Teil der Prüfkörper (T 2, T 3, T 5 und T 6) wurden je zwei vertikale Meßstrecken

über Fugen hinweg mit *Induktiven Wegaufnehmern* bestückt. Prüfkörper T 6 wurde zusätzlich mit einem Induktiven Wegaufnehmer auf dem mittleren Stein versehen /34/.

Die erste Setzdehnungsablesung erfolgte am 30.09.1994. Nachdem die Dreisteinkörper ein Alter von sechs Wochen erreicht hatten, erfolgten die weiteren Messungen im Abstand von ca. sechs bis acht Wochen /34/. Die induktiven Wegmessungen an der Musterfläche wurden vom 30.05.1996 bis Oktober 1996 durchgeführt.

7.6.2 Musterflächenuntersuchungen

Der modifizierte Faserstopfmörtel HGZ_{RU} wurde mit dem beschriebenen Deckmörtel Re im Oktober 1995 zur Erprobung am Bauwerk bei der Anlegung einer Musterverfugung am östlichen Strebepfeiler der Palassüdwand (siehe Bild 7.9) eingesetzt.

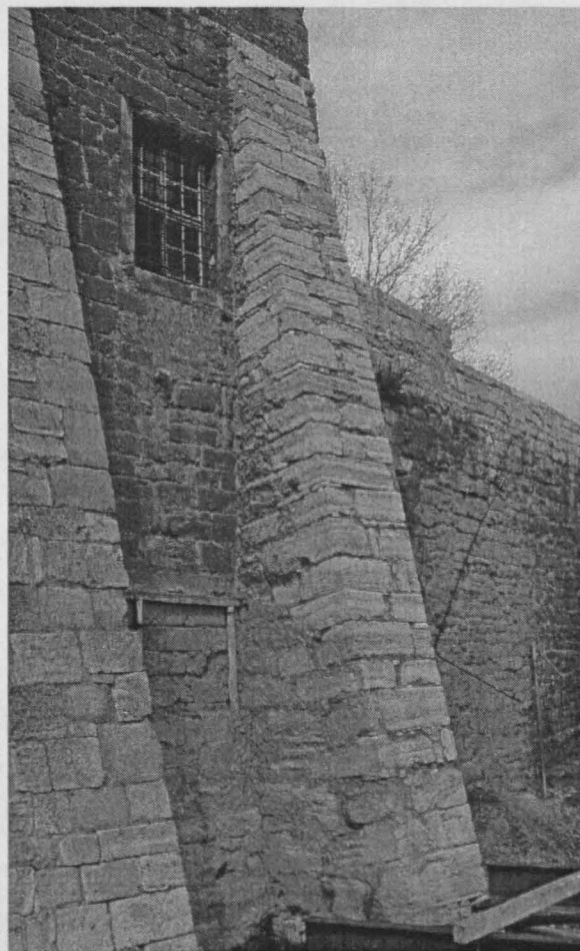


Bild 7.9: Runneburg Weißensee, Strebepfeiler vor Musterflächenanlegung (Mai 1995)
/34/

Es konnte in diesem Untersuchungsstadium (wie schon bei Aufstellung der Freibewitterungskörper) noch nicht auf den eigens für die Fugensanierung Runneburg entwickelten *HGZ*-Fugendeckmörtel zurückgegriffen werden.

Zunächst wurde der Pfeiler mit dem JOS-Verfahren trocken gereinigt, die Fugentiefen kartiert und die Fugen bei möglichst weitgehender Erhaltung der historischen Mörtelsubstanz händisch mit Klüpfel und Meißel ausgeräumt. Nach erneuter Kartierung der Fugentiefen und abschnittsweiser Vornässung erfolgte der Einbau des chargenweise hergestellten Fasermörtels mit dem Bildhauerhammer, wobei die äußeren 2 bis 3 cm der Fugen freigehalten wurden. Der verbleibende Raum wurde wie bei der Anlegung der Musterfläche in Ellrich und Walkenried nach Abklingen der ersten Hydratationsphase des Fasermörtels bei Nachbehandlung mit befeuchteten Jutebahnen und Frostschutzfolie erneut angefeuchtet und mit Deckmörtel Re verfügt. Anschließend erfolgte eine neuntägige Nachbehandlung der fertigen Musterfläche /34/. Im Mai 1996 wurden acht Induktive Wegaufnehmer appliziert (je zwei vertikal und horizontal auf Fugen sowie je zwei vertikal und horizontal über Fugen hinweg, siehe Bild 7.10 und S. A31) und Bewegungsmessungen begonnen, die bis zum Zeitpunkt der Berichterstattung andauern.

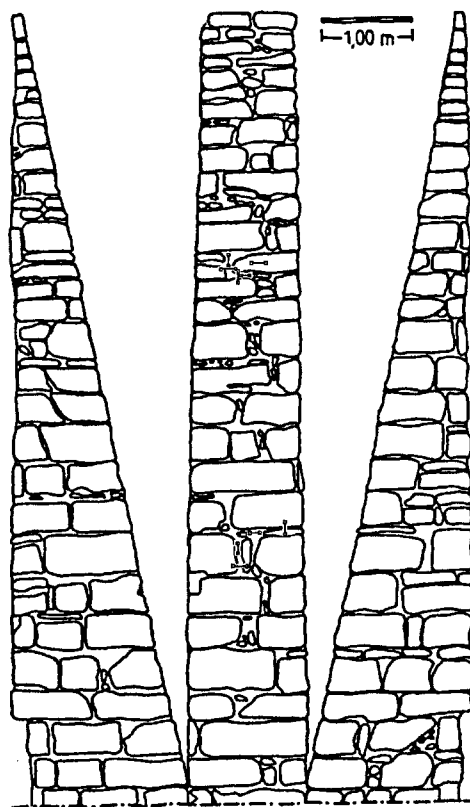


Bild 7.10: Runneburg Weißensee, Strebepfeiler mit Lage der Meßstrecken, schematisch
/34/

7.7 Zusammenfassender Überblick des Gesamtmeßprogramms

In Tabelle 7.7, Tabelle 7.8 und Tabelle 7.9 ist das gesamte im Zuge der Mörteloptimierung an Prüfkörpern und Musterflächen durchgeführte Untersuchungsprogramm zusammengefaßt.

Tabelle 7.7: Überblick des Gesamtmeßprogramms an Musterflächen

Untersuchungsort	Natursteinart	Mörtel	Angelegt	Untersuchungsbeginn	Untersuchungsende
Walkenried	Harzer Dolomit	HGZ	Juli 1992	15.07.1992	01.10.1993
		HGJ _{um}			
		HGQ _{um}			
		Re			
		Klobo			
Ellrich	Harzer Dolomit	HGJ _{EL,R}	September 1994	22.09.1994	Januar 1997
Weißensee	Travertin	HGZ _{RU,R}	10/11.1995	Mai 1996	Ende 1997

Tabelle 7.8: Überblick des Gesamtmeßprogramms an Prüfkörpern der Serie 1

Serie	Art des Prüfkörpers	Untersuchungsort	Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Natursteinart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
1	Dreisteinkörper	MPA Braunschweig	April/Mai 1992	Klimakammer	Sander	HGZ	S 1, S 2	11.09.92
					Schilfsandstein	HGJ _{um}	S 3, S 4	
					Rüthener	HGZ	G 1, G 2	11.09.92
					Grünsandstein	HGJ _{um}	G 3, G 4	
					Zw. Kohlesandst.	HGZ	K 1, K 2	11.09.92
					Harzer Dolomit	HGZ	D 1, D 2	27.08.92
						HGJ _{um}	D 3, D 4	29.07.92
						Sanierputz Re	D 5, D 6	30.07.92
			Juli 1992	Freibewitterung	Sander	HGZ	S 5, S 6	21.03.96
					Schilfsandstein	HGJ _{um}	S 7, S 8	
					Rüthener	HGZ	G 5, G 6	
					Grünsandstein	HGJ _{um}	G 7, G 8	
					Harzer Dolomit	HGZ	D 7, D 8	11.06.93
						HGJ _{um}	D 9, D 10	
						Sanierputz Re	D 11, D 12	
		Walkenried	16.06.92	Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGZ	D 13, D 14	07.06.93
						HGJ _{um}	D 15, D 16	
						Sanierputz Re	D 17, D 18	

Zw. Kohlesandst. = Zwickauer Kohlesandstein

Tabelle 7.9: Überblick des Gesamtmeßprogramms an Prüfkörpern der Serien 2 und 3

Serie	Art des Prüfkörpers	Untersuchungsort	Auslagerungszeitpunkt	Bewitterungsart	Natursteinart	Mörtel	Prüfkörper	Abbau
2	Dreisteinkörper	Eltrich	28.10.93	Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGJ _{EL,0}	D 19, D 20	27.09.96
						HGJ _{EL,R}	D 21, D 22	03.08.94
						HGJ _{EL,S}	D 23, D 24	03.08.94
						HGQ _{EL,0}	D 25, D 26	03.08.94
						HGQ _{EL,R}	D 27, D 28	
						HGQ _{EL,S}	D 29, D 30	
	Viersteinkörper	Eltrich	28.10.93	Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGJ _{EL,0, R, S}	D 31	20.01.94
							D 32	25.11.94
							D 33	27.09.96
							D 34	17.05.94
						HGQ _{EL,0, R, S}	D 35	20.01.94
							D 36	25.11.94
							D 37	03.08.94
							D 38	17.05.94
3	Dreisteinkörper	Weißensee	27./28.09.1994	Freibewitterung	Travertin	HGJ _{EL,0}	T 1, T 2	Oktober 1996
						HGJ _{EL,R}	T 3, T 4	
						HGZ _{RU,R}	T 5	
						HGZ _{RU,0}	T 6	
		MPA Braunsch.	Januar 1995	Freibewitterung	Travertin	HGJ _{EL,R,0}	T 7	Januar 1997
						HGZ _{RU,R,0}	T 8	

7.8 Ergänzende Untersuchungen nach Abbau der Versuchskörper

An den bewitterten Drei- und Viersteinkörpern wurden nach ihrem Abbau und dem Lösen des Zwängungsrahmens für vergleichende Gegenüberstellungen mit Ergebnissen an Prüfkörpern mit junger Verfugung (siehe Abschnitt 7.3.1) die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Stein-Mörtelkombinationen untersucht. Wie im Fall der Zweisteinkörper mit 28 Tage alter Verfugung wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- die Haftzugfestigkeit des Mörtel-Steinverbunds,
- das Bruchbild des Verbundbereichs Mörtel-Stein und
- die Haftzugfestigkeit des Gesteingefüges (DIN 18555, Teil 6/4).

Die Ermittlung der *Dreisteinkörper*-Haftzugfestigkeiten erfolgte nach dem in Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Prinzip, wobei der jeweilige Prüfkörper im Bereich des mittleren Steins in horizontaler Richtung geteilt wurde, um eine gesonderte Prüfung beider Fugen zu

ermöglichen (siehe Bild 6.5). Bei Untersuchungen an Travertin wurden die so entstandenen Körper vor der Prüfung zusätzlich in vertikaler Richtung zweigeteilt, so daß sich Abmessungen wie im Fall der aus Vorversuchen bekannten Zweisteinkörper ergaben. Dies versprach eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse. Analog erfolgte die Ermittlung der Haftzugfestigkeit an *Viersteinkörpern* nach horizontaler Auftrennung der Prüfkörper in drei Teile und anschließender vertikaler Aufteilung in ebenfalls drei Abschnitte (siehe Bild 6.5). Im Zuge der Untersuchungen konnte aufgrund des in Abschnitt 6.4 erläuterten gleichartigen Aufbaus der Prüfkörperserie die Änderung der Ergebniswerte in Abhängigkeit vom Alter der Verfugung erfaßt werden. Die erzielten Ergebnisse sind aufgrund der geringen Anzahl geprüfter Körper nicht repräsentativ. Neben **Haftzugfestigkeiten** konnten anhand visueller Analysen des **Bruchbilds** Aussagen über die Feuchteverteilung in der Fuge und die Bruchart gemacht werden. Die **Haftzugfestigkeit der Gesteinsgefüge** wurden an ausgewählten Prüfkörpern ermittelt. Darüber hinaus wurden Dünnschliffe angefertigt und auf mikroskopisch kleine an der Steinflanke haftende Mörtelreste hin untersucht /34/, /35/. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in /33/ und /34/ zusammengestellt.

8 Gegenüberstellung und Vergleich der Verbund-/Verformungsmeßergebnisse

8.1 Ausgewertete Messungen und Vorgehensweise

Die umfangreichen Daten der Verformungsmessungen sind im Anhang nach Untersuchungsorten geordnet beigelegt. Um die bis zu drei Jahre lang andauernden Messungen auswerten zu können, erfolgte zunächst eine tageweise Mittelung der Ergebniswerte. Die auf dieser Basis rechnerisch bestimmten Dehnungsverläufe wurden durch ebenfalls tageweise gemittelte Verläufe des gemessenen Lufttemperaturgangs ergänzt und sind im Anhang beigelegt. Im Fall von Dehnungsverläufen erfolgten Ergänzungen von Ausfallzeiträumen der Meßgeräte durch Einfügung von Geraden zwischen bekannten End- und Anfangspunkten der Messungen. Die naturgemäß stärker schwankenden Lufttemperaturverläufe wurden hingegen nicht ergänzt. Statt dessen erscheinen hier während Ausfallzeiträumen Lücken im Kurvenverlauf. Dehnungsergebnisse, die über Mörtelfugen hinweg ermittelt wurden, sind mit solchen, die auf Steinmaterial gemessen wurden, nicht uneingeschränkt vergleichbar. Insbesondere eine Übertragung des spezifischen Mörtelverhaltens auf Meßstrecken abweichender Länge muß mit Vorsicht erfolgen, da die im Rahmen des vorliegenden Berichts ermittelten Ergebnisse Anteile aus dem verwendeten Gestein beinhalten. Dies ist der Fall, da die Endpunkte der Meßstrecken auf den angrenzenden Steinen liegen (siehe Abschnitt 7.3.3) und die hier angegebenen Dehnungswerte keine rechnerischen Korrekturen dieses Effekts beinhalten. Deshalb sind die Diagramme durch ungefähre Angaben der über Mörtelfugen zugrunde gelegten Meßstreckenlängen ergänzt und auf diese bezogen zu betrachten.

Induktive Wegmessungen haben bei entsprechender Messungsdichte gegenüber Setzdehnungsmessungen den Vorteil quasi kontinuierlicher Erfassung von Wegänderungen (siehe Abschnitt 7.2). Durch geringe Zeitabstände zwischen den Messungen wird zudem vermieden, daß Momentaufnahmen des Verformungszustands, wie sie sich beispielsweise bei plötzlichen Klimaereignissen einstellen, losgelöst von ihrer Entwicklung registriert werden und zu Fehlinterpretationen des Dehnungsverlaufs führen. Deshalb erfolgen in erster Linie Auswertungen mittels Induktiver Wegaufnahme bestimmten Dehnungsänderungen, und es wird nur in Ausnahmefällen, wenn an einer Prüfkörperserie lediglich Setzdehnungsmessungen durchgeführt wurden, auf die mit dieser Methode ermittelten Ergebnisse zurückgegriffen. So wird weitgehend vermieden, daß in ihrer Aussagekraft fragliche Vergleiche zwischen, in unterschiedlichen Mörtelfugenbereichen gemessenen, Wegänderungen angestellt werden.

Im folgenden werden die Dehnungen der untersuchten Mörtelsysteme nach Untersuchungsorten getrennt, zunächst über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg, gegenübergestellt und spezifische Unterschiede und Eigenarten herausgestellt.

Tabelle 8.1: Überblick der ausgewerteten Messungen an Prüfkörpern, Serie 1

Art des Prüfkörpers	Untersu- chungsort	Bewitterungsart	Natursteinart	Mörtel	Prüf- körper	Untersuchungszeitraum		Meß- methode
						von	bis	
Dreistein- körper	MPA Braun- schweig	Klimakammer	Sander Schilfsandstein	HGZ	S 1	30.04.92	11.09.92	SDM
					S 2			
				HGJ _{um}	S 3			
					S 4			
			Rüthener Grünsandstein	HGZ	G 1	16.04.92	11.09.92	
					G 2			
				HGJ _{um}	G 3			
					G 4			
			Zwickauer Kohlesandstein	HGZ	K 1			
					K 2			
			Harzer Dolomit	HGZ	D 1	29.04.92	27.08.92	
					D 2			
				HGJ _{um}	D 3	22.05.92		
					D 4	27.05.92		
				Sanierputz Re	D 5	22.05.92	11.09.92	
					D 6	20.05.92		
		Freibewitterung	Sander Schilfsandstein	HGZ	S 5	14.08.92	17.06.93	IWM
				HGJ _{um}	S 8			
			Rüthener Grünsandstein	HGZ	G 6	01.08.92	17.06.93	
				HGJ _{um}	G 7			
	Harzer Dolomit		HGZ	D 7	14.08.92	07.06.93		
			HGJ _{um}	D 9				
			Sanierputz Re	D 11				
	Walkenried		Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGZ	D 13	15.07.92	
		HGJ _{um}			D 15			
		Sanierputz Re			D 17			

Anschließend wird anhand kurzer Ausschnitte einzelner Dehnungsverläufe, die sich durch ein im Wechsel mit Trockenheit auftretendes Niederschlagsereignis auszeichnen, der Einfluß zeitlich begrenzter Feuchteeinwirkung auf das spezifische Verhalten von Mörtel und Naturstein untersucht. Dabei werden unter Verzicht auf eine Mittelung der Ergebniswerte Vergleiche zwischen Musterflächen und Prüfkörpern gezogen. Hierzu wird auf Zeiträume

nach Abklingen der stärksten Hydratationsphase und ähnliche Mörtelalter zurückgegriffen. Es werden nur Mörtelsysteme und Meßstreckenarten berücksichtigt, die sowohl an Musterflächen als auch an Prüfkörpern angewendet wurden. In den Tabellen 8.10, 8.11 und 8.12 sind die ausgewerteten Messungen geordnet nach Untersuchungsorten und Prüfkörperarten unter Angabe der angewendeten Meßmethode zusammengestellt.

Tabelle 8.2: Überblick der ausgewerteten Messungen an Prüfkörpern, Serien 2 und 3

Art des Prüfkörpers	Untersu- chungsort	Bewitterungsart	Natursteinart	Mörtel	Prüf- körper	Untersuchungszeitraum		Meß- methode
						von	bis	
Dreistein- körper	Ellrich	Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGJ _{EL,0}	D 19	10.11.93	23.09.95	IWM
				HGJ _{EL,R}	D 21		02.08.94	
				HGJ _{EL,S}	D 23			
				HGQ _{EL,0}	D 25			
				HGQ _{EL,R}	D 27			
				HGQ _{EL,S}	D 29			
Vierstein- körper	Ellrich	Freibewitterung	Harzer Dolomit	HGJ _{EL,0, R, S}	D 33	28.10.93	27.09.96	SDM
					D 34		29.04.94	
				HGQ _{EL,0, R, S}	D 37		03.08.94	
					D 38		29.04.94	
Dreistein- körper	Weißensee	Freibewitterung	Travertin	HGJ _{EL,0}	T 2	28.10.94	26.07.96	IWM
				HGJ _{EL,R}	T 3			
				HGZ _{RU,R}	T 5			
				HGZ _{RU,0}	T 6			

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden lediglich die Messungsergebnisse der freien Bewitterung von Drei- und Viersteinkörpern in Braunschweig, Walkenried, Ellrich und Weißensee sowie an den Musterflächen in Ellrich und Weißensee näher betrachtet und bewertet. Die Klimakammeruntersuchungen an der MPA Braunschweig dienten lediglich der Gewinnung erster Erkenntnisse bezüglich des Verformungsverhaltens der untersuchten Mörtelsysteme und sind in /33/ ausführlich beschrieben. Die Musterfläche in Walkenried wurde als Vorversuch („Übungswand“) für die Anlegung der Musterfläche in Ellrich angelegt und lediglich mit zwei induktiven Meßstrecken bestückt (siehe Abschnitt 7.4.2). Deshalb sind die Verformungen der Prüfkörper in der Klimakammer und der Übungswand in Walkenried der Vollständigkeit halber im Anhang beigelegt (S. A1 ff. bzw. A11 f.), werden jedoch nicht bzw. nur in begrenztem Umfang ausgewertet.

Tabelle 8.3: Überblick der ausgewerteten Messungen an Musterflächen

Untersuchungsort	Natursteinart	Mörtel	Untersuchungszeitraum		Meßmethode
			von	bis	
Walkenried	Harzer Dolomit	HGZ	15.07.92	07.06.93	IWM
Ellrich		HGJ _{EL,R}	22.09.94	27.01.97	
Weißensee	Travertin	HGZ _{RU,R}	30.05.96	27.01.97	

Mit Induktiven Wegmessungen konnte aufgrund der hygri-schen Empfindlichkeit der Meßgeräte erst nach Abschluß der Mörtelnachbehandlungsmaßnahmen begonnen werden, während die Instrumentierung der Setzdehnungsmeßpunkte bereits unmittelbar nach Herstellung der Prüfkörper erfolgte (siehe Abschnitt 7.2). Hieraus folgt, daß die erste Hydratationsphase durch Induktive Wegaufnahmen nicht erfaßt werden konnte und den Dehnungsberechnungen infolge dessen unterschiedliche Nullängen zugrunde liegen. In Bild 8.1 sind die anhand von Setzdehnungsmessungen und Induktiven

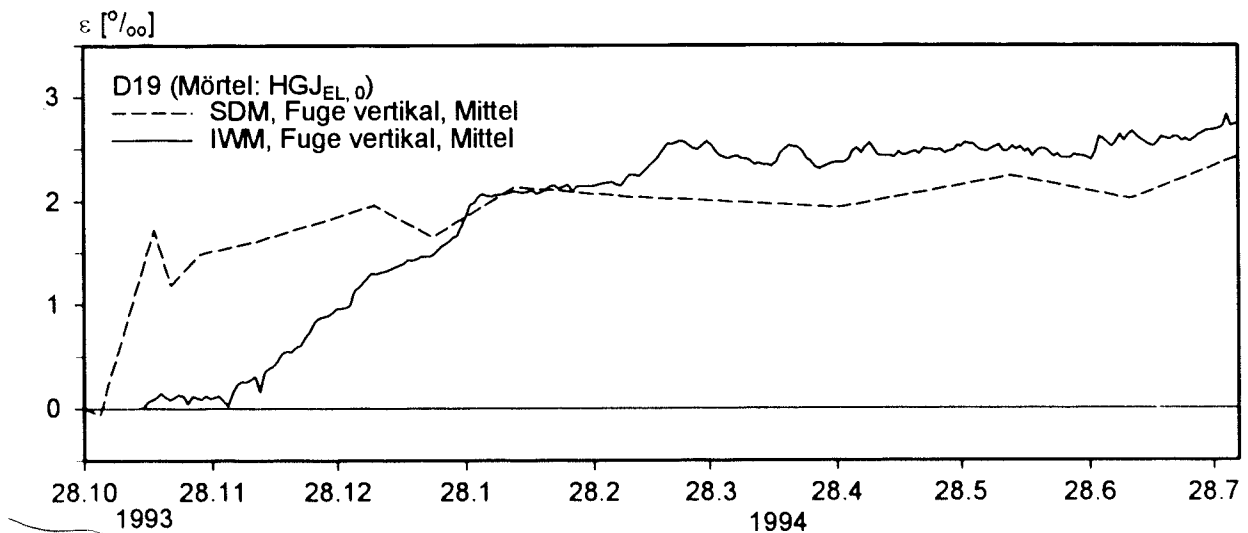


Bild 8.1: Prüfkörper D 19, Gegenüberstellung der Meßergebnisse mit IWM und SDM. 28.10.1993 - 02.08.1994

Wegaufnahmen an Prüfkörper D 19 ermittelten Dehnungen beispielhaft gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist die mittels SDM gemessene starke Anfangsverformung in den ersten Tagen, die bei der induktiven Messung nicht erfaßt wird. Bezieht man beide Dehnungsverläufe auf den Messungsbeginn 10.11.93 und verschiebt die Abszissenachse der mittels Setzdehnungsmessung ermittelten Kurve um den bis zu diesem Termin gemessenen Dehnungsbetrag von ca. 1,3 ‰ nach oben, so sind zwischen den beiden Kurvenverläufen

bei grundsätzlich gleicher Entwicklungstendenz deutliche quantitative Unterschiede auszumachen. Beispielsweise liegen die Enddehnungen dann bei ca. 3,7 ‰ (IWM) und ca. 1,1 ‰ (SDM). Dieses Phänomen ist durch unterschiedliche Anordnung der zugehörigen Meßstrecken - einerseits im Rand-, andererseits im Mittelbereich der Fugenlänge (siehe S. A13) - und Inhomogenitäten der untersuchten Materialien zu erklären.

Vergleichsberechnungen ergaben, daß der Einfluß von Temperaturschwankungen auf die verwendeten Induktiven Wegaufnehmer vernachlässigbar klein ist, so daß auf eine rechnerische Temperaturkorrektur der induktiv ermittelten Meßergebnisse (siehe Abschnitt 7.3.3) verzichtet werden konnte.

8.2 Betrachtung von Gesamtzeiträumen

8.2.1 Freibewitterungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig

Die Dehnungsverläufe der mit *Sander Schilfsandstein* hergestellten Dreisteinkörper S 5 und S 8 (siehe S. A6) weisen sowohl im Fall der vertikalen Mörtelfugen- als auch der vertikalen Steinverformung starke Schwankungen auf. Die *Mörtelfugenverformungen* sind durch einen steilen Anstieg auf ca. 2,5 ‰ zu Messungsbeginn im August 1992 gekennzeichnet, bevor sie auf hohem Niveau um eine horizontal bis leicht ansteigend verlaufende gedachte Ausgleichsgerade schwanken. Dabei übt der Temperaturverlauf keinen sichtbaren Einfluß aus. Über der *HGZ*-Mörtelfuge des Körpers S 5 werden bei Messungsende im Juni 1993 Dehnungen von ca. 8 ‰ erreicht. Die über der *HGJ_{um}*-Mörtelfuge des Körpers S 8 gemessenen Dehnungen erreichen bei vereinzelt Schwankungen während der Untersuchungsdauer in den negativen Bereich einen Endwert von ca. 6 ‰. Die *Steinverformungen* der beiden Prüfkörper ähneln sich qualitativ. Ihre Schwankungen sind weniger stark ausgeprägt als die der Mörtelfugen, aber deutlich zu erkennen. Ein starker Dehnungsanstieg zu Messungsbeginn tritt naturgemäß nicht ein. Sowohl an S 5 als auch an S 8 werden Enddehnungen von ca. 1,5 ‰ erreicht. Beide Prüfkörper erfahren während des Untersuchungszeitraums zeitweilig negative Dehnungen, die Steinverformung von S 5 erreicht mit ca. 1,5 ‰ ein geringeres globales Maximum als die des S 8 mit ca. 4 ‰. Dies ist durch die Porosität des Gesteins und die damit einhergehende starke Kapillaraktivität (siehe Abschnitt 4.4) zu erklären. Deutlich ins Auge fällt das einander entgegengerichtete Schwankungsverhalten von Stein- und Mörtelfugenverformung des Prüfkörpers S 5, das auf ein Wechselspiel der beiden Zwängungskomponenten hindeutet: Der Stein gibt dem Verformungsbestreben des

quellzementhaltigen Mörtels nach. Prüfkörper S 8 zeigt dieses Verhalten lediglich gegen Ende der Messungen.

Die mit **Rüthener Grünsandstein** hergestellten Dreisteinkörper G 6 und G 7 (siehe S. A7) weisen sowohl im Fall der vertikalen Mörtelfugen- als auch der vertikalen Steinverformung untereinander weitgehend korrespondierende Dehnungsverläufe auf, die gegenüber den an Sander Schilfsandstein ermittelten Ergebnissen weniger stark schwanken. Die *Mörtelfugenverformungen* zeichnen sich wie im Fall des Sander Schilfsandsteins durch eine im August 1992 anfänglich starke Zunahme aus. Dabei werden Dehnungen von jeweils 1 ‰ erreicht. Dies entspricht etwa der Hälfte der - aufgrund der geringeren Porosität des Sander Schilfsandsteins niedrigeren - Enddehnungen (G 6, *HGZ*-Mörtelfuge: ca. 2 ‰; G 7, *HGJ_{um}*-Mörtelfuge: ca. 1,8 ‰). Nach einem zeitweiligen Rückgang der Dehnungen im September 1992 ist kurz darauf ein beinahe konstanter Verlauf zu beobachten, der lediglich durch einige kurze Schwankungen in negativer Richtung unterbrochen wird. Die Schwankung Anfang Januar 1993 könnte auf die in diesem Zeitraum eingetretene Temperaturabnahme auf Werte um - 13 °C zurückzuführen sein. Sonst spielt der Temperatureinfluß nur eine untergeordnete Rolle. Die *Steinverformungen* der beiden Prüfkörper ähneln sich in ihrem qualitativen Verlauf, sind jedoch im Fall des Körpers G 6 mit maximal ca. 0,2 ‰ weitaus geringer als die an Körper G 7 ermittelten Werte (maximal ca. 2 ‰). In beiden Fällen sind geringe Schwankungen zu erkennen; eine größere Schwankung in negativer Richtung ist - wie bei den vertikalen Mörtelfugenverformungen - Anfang Januar 1993 zu beobachten.

Die mit **Harzer Dolomit** hergestellten Dreisteinkörper D 7, D 9 und D 11 (siehe S. A8) weisen recht unterschiedliche Dehnungsverläufe mit relativ geringen Höchstwerten auf. Die vertikale *Mörtelfugenverformung* des mit *HGZ* hergestellten Körpers D 7 verläuft von Beginn der Messungen im August 1992 an im Gegensatz zu den mit diesem Mörtel an Sander Schilfsandstein und Rüthener Grünsandstein erzielten Ergebnissen mit geringer, relativ konstanter Steigung bis zu ihrem Höchstwert von ca. 2 ‰, der im Januar 1993 erreicht wird. Dabei bleiben die Dehnungswerte durchweg positiv. In der Zeit niedriger Temperaturen zu Beginn des Monats Januar 1993 ist im Gegensatz zu den übrigen an der MPA Braunschweig ausgelagerten Prüfkörpern keine besondere Verformungsreaktion zu beobachten. Im weiteren Verlauf schwanken die gemessenen Dehnungen mit geringer Amplitude. Ein anderes Bild bietet die vertikale *HGJ_{um}*-Mörtelfugenverformung des Körpers D 9. Die Kurve verläuft nach anfänglichem geringen Anstieg bei sehr geringen Schwankungen im negativen Bereich bis hin zu ca. - 0,6 ‰ Dehnung. Anfang Januar 1993 haben die Lufttemperaturen von ca. - 13 °C einen Kurvenausschlag nach unten zur Folge, dem jedoch kurz darauf eine Rückkehr zur vorherigen Tendenz folgt. Im März 1993 wer-

den die Dehnungen positiv bis hin zu ca. 0,3 ‰, um zum Ende der Messungen auf Null abzufallen. Der an Prüfkörper D 11 verwendete *Sanierputz Re* quillt am Tag des Messungsbeginns relativ stark und erreicht eine Dehnung von ca. 0,2 ‰. Hieran schließt sich bis November 1992 ein langsamer Anstieg auf 0,4 ‰ Dehnung an, ein Wert, der bis zum Ende der Messungen im Juni 1993 nahezu konstant bleibt. Lediglich im Januar ist, wie bei den übrigen Körpern, ein kurzzeitiger Kurvenausschlag in negativer Richtung zu beobachten, bevor sich der Dehnungsverlauf mit unveränderter Tendenz fortsetzt. Die *Steinverformungen* der drei Prüfkörper ähneln sich qualitativ wie quantitativ während des gesamten Untersuchungszeitraums. Sie bewegen sich bei geringen Schwankungen lange Zeit bei ca. 0,3 ‰, bevor sie im März 1993 - offensichtlich mit zunehmenden Lufttemperaturen - bis auf etwa 1,2 ‰ ansteigen. Mit Ausnahme der Messungen am Körper D 7 ist - wie bei den vertikalen Mörtelfugenverformungen - Anfang Januar 1993 jeweils eine größere Schwankung in negativer Richtung zu beobachten.

8.2.2 Freibewitterungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried

Die *Mörtelfugen* der mit Harzer Dolomit hergestellten Dreisteinkörper D 13, D 15 und D 17 (siehe S. A10) weisen - abgesehen vom Zeitraum unmittelbar nach Messungsbeginn im Juli 1992 - durchweg positive Dehnungsverläufe mit gegenüber dem an Sander Schilfsandstein beobachteten Verhalten sehr geringen Schwankungen auf. Die Verläufe der Dehnungsentwicklungen an *HGZ*- und *HGJ_{um}*-Mörtelfugen (Prüfkörper D 13 und D 15) ähneln sich qualitativ. An beiden Prüfkörpern werden Enddehnungen von ca. 6 ‰ erreicht, wobei im Fall des *HGJ_{um}*-Mörtels stärkere Anfangsverformungen und ein Abflachen der Kurve bereits im August 1992 zu beobachten sind. Die *HGZ*-Mörtelfuge zeigt hingegen von Beginn bis Ende der Messungen ein fast lineares Dehnungsverhalten. Die Mörtelfuge aus *Sanierputz Re* weist ein insgesamt sehr viel geringeres Quellverhalten auf und erreicht eine Enddehnung von ca. 0,3 ‰. Die *Steinverformungen* der drei Prüfkörper ähneln sich qualitativ während des gesamten Untersuchungszeitraums. Sie bewegen sich bei geringen Schwankungen und zur Mörtelfugenverformung korrespondierendem Verlauf bis zu Endwerten zwischen ca. 0,3 ‰ und ca. 2 ‰. Eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit des Dehnungsverhaltens ist - auch aufgrund einiger systembedingter Lücken im Verlauf der Lufttemperaturkurve - nicht festzustellen.

8.2.3 Freibewitterungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich

8.2.3.1 Untersuchungen an Dreisteinkörpern

Die an den mit Harzer Dolomit hergestellten Dreisteinkörpern D 19, D 21, D 23, D 25, D 27 und D 29 gemessenen Verformungen sind auf den Seiten A14 und A15 in numerischer Ordnung dargestellt. Auf Seite A16 bis A18 sind die Dehnungsergebnisse geordnet nach Deckmörtelarten beigelegt.

Anhand letzterer Gegenüberstellung sind bei den homogen mit den Mörtelsystemen $HGJ_{EL,0}$ bzw. $HGQ_{EL,0}$ verfugten Prüfkörper **D19 und D 25** positive Tendenzen der vertikalen *Mörtelfugenverformung* zu erkennen. Die Steigung des Dehnungsverlaufs ist bei Prüfkörper D 25 deutlich stärker als bei Körper D 19 - das $HGQ_{EL,0}$ -Mörtelsystem quillt im Anfangsstadium erheblich stärker als der $HGJ_{EL,0}$ -Mörtel. Die Messungen an Prüfkörper D 25 endeten bereits ca. 14 Monate vor dem Untersuchungsende an Körper D 19. Der Kurvenverlauf des D 19 erreicht ein globales Maximum von ca. 4 ‰, während die Dehnungen des D 25 lediglich auf ca. 3 ‰ anwachsen. Bei Körper D 19 ist dabei ein kontinuierlicher Anstieg des Kurvenverlaufs bis zur Stagnation von April 1995 anzubemerken. Die Dehnungen des D 25 hingegen sinken nach früh einsetzender Stagnation von April 1994 an bis zu einem Endwert bei Abbau des Prüfkörpers von ca. 1 ‰ ab. Eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Dehnungsverhaltens ist wegen einiger systembedingter Lücken im Verlauf der Lufttemperaturkurve lediglich im Februar 1994 für Prüfkörper D 25 auszumachen.

Die unter Verwendung von Deckmörtel aus Sanierputz Re mit den Mörtelsystemen $HGJ_{EL,R}$ bzw. $HGQ_{EL,R}$ verfugten Prüfkörpern **D21 und D 27** (siehe S. A17) erfahren insgesamt viel geringere vertikale *Mörtelfugenverformungen* als die homogen bis zur Vorderkante verfugten Prüfkörper D 19 und D 25. Sowohl bei D 21 als auch D 27 treten außerdem nach Messungsbeginn im November 1993 zunächst negative Dehnungen auf (ca. - 0,3 ‰ bzw. ca. - 0,1 ‰). Diese schlagen allerdings in beiden Fällen im Lauf der Untersuchungszeiträume in den positiven Bereich um - im Fall des Körpers D 21 im August 1994, bei D 27 bereits im Dezember 1993. Dies weist auf ein deutlich stärkeres Quellen des $HGQ_{EL,R}$ -Mörtelsystems auch bei den im Winter 1993 herrschenden geringen Lufttemperaturen hin, während das $HGJ_{EL,R}$ -System dieses Verhalten erst im Sommer des Jahres 1994 zeigt. Da die Induktiven Wegmessungen erst nach Ende der Nachbehandlungszeit und somit der ersten Hydratationsphase begannen, ist jedoch zu bedenken, daß negative Anfangsdehnungen auch als Reaktion auf Kälteeinwirkung im November 1993 nach dem Abklingen starker Reaktionswärmeentwicklung zu verstehen sein könnten. An der Ver-

formungsentwicklung des Prüfkörpers D 27 ist zudem eine deutliche „Dehnungsantwort“ auf den anhand der Lufttemperaturentwicklung zu erkennenden Kälteeinbruch im Februar 1994 zu sehen. Da die Messungen an diesem Körper jedoch bereits im August 1994 endeten, kann der Lufttemperatureinfluß im Winter 1994/95 nur für Körper D 21 verfolgt werden. Dabei zeigt sich wie für den Fall der Kälteeinwirkung im Februar 1994 keine nennenswerte Reaktion des $HGJ_{EL,R}$ -Mörtelsystems.

Die mit den Mörtelsystemen $HGJ_{EL,S}$ bzw. $HGQ_{EL,S}$ (Deckmörtel aus Mörtel der Gesamthochschule Siegen) verfugten Prüfkörper **D23 und D 29** (siehe S. A18) weisen untereinander im Gegensatz zu den Prüfkörpern D 19/D 25 und D 21/D 27 große Abweichungen der Dehnungsentwicklung auf. Die an Prüfkörper D 23 ermittelten vertikalen *Mörtelfugenverformungen* sind bei mäßiger Steigung mit maximal ca. 0,3 ‰ relativ gering, während die Mörtelfuge des Körpers D 29 nach heftiger Anfangsverformung in den ersten Untersuchungswochen Dehnungen von bis zu ca. 6,5 ‰ erfährt. Diese nehmen bis zum Untersuchungsende kontinuierlich zu. Dabei ist wie bei den Prüfkörpern D 25 und D 27 eine Dehnungsreaktion des Mörtels auf den Zeitraum winterlicher Temperaturen im Februar 1994 zu erkennen, die sich in einem vorübergehenden Abflachen der Dehnungskurve äußert. Prüfkörper D 23 zeigt kein entsprechendes Verhalten.

8.2.3.2 Untersuchungen an Viersteinkörpern

Die an den mit Harzer Dolomit hergestellten Viersteinkörpern D 33/D 34 und D 37/D 38 gemessenen Verformungen sind auf den Seiten A20 und A21 in numerischer Ordnung beigefügt. Auf Seite A22 bis A24 sind die Dehnungsergebnisse geordnet nach Deckmörtelarten dargestellt. Da die Untersuchungen an den Körpern D 37 und D 38 lediglich bis Ende April 1994 andauerten, während die mit den Ergebnissen von D 34 gemittelten Messungen an den Körpern D 33 bis Ende September 1996 fortgeführt wurden, ist eine vergleichende Gegenüberstellung nur eingeschränkt möglich. Im Zuge des an Viersteinkörpern angewendeten Setzdehnungsmeßverfahrens wurden neben den mit Induktiver Wegaufnahme üblicherweise gemessenen vertikalen Mörtelfugen- und Steinverformungen auch horizontale Dehnungen der Mörtelfuge und des Steins ermittelt.

Anhand der nach Deckmörtelarten geordneten Gegenüberstellung sind bei den homogen bis zur Steinvorderkante mit den Mörtelsystemen $HGJ_{EL,0}$ bzw. $HGQ_{EL,0}$ verfugten oberen Fugen der Prüfkörper D 33/34 bzw. D 37/38 unterschiedliche Tendenzen der *vertikalen Mörtelfugenverformung* zu erkennen. Während an den Prüfkörpern D 33/D 34 schwankende Dehnungen im negativen bis geringfügig positiven Bereich beobachtet werden kön-

nen, die ein globales Minimum von ca. - 1,3 ‰ erreichen, steigt der Dehnungsverlauf der Körper D 37/ D 38 zu Beginn der Messungen sehr stark an und stagniert bereits von Januar 1994 an bei 3 ‰. Die *horizontale Mörtelfugendehnung* der Prüfkörper D 33/D 34 schwankt wie die *vertikale Steindehnung* mit einem Maximalwert von ca. 1 ‰ und einem Minimalwert von ca. - 1,6 ‰ um die Abszissenachse, während die *horizontale Steinverformung* nach anfänglicher Übereinstimmung mit den vertikalen Steindehnungen stetig im negativen Bereich bei ca. - 1 ‰ verläuft. Ein anderes Bild bieten die an den Körpern D 37/D 38 ermittelten Ergebnisse: Die horizontale Fugenverformung bleibt stets positiv im Bereich von bis zu ca. 0,7 ‰, während die vertikalen und horizontalen Steinverformungen bis zum Messungsende im April 1994 wie im Fall der Körper D 33/D 34 beinahe deckungsgleich im negativen Dehnungsbereich mit bis zu ca. - 0,7 ‰ verlaufen.

An den mit den Mörtelsystemen *HGJ_{EL,R}* bzw. *HGQ_{EL,R}* unter Verwendung des Deckmörtels *Re* hergestellten mittleren Fugen der Prüfkörper D 33/34 bzw. D 37/38 sind *vertikale Mörtelfugendehnungen* zu erkennen, deren Verlauf dem der homogen verfugten oberen Fugen ähnelt. Im Fall der Prüfkörper D 33/D 34 werden jedoch nach einer Übereinstimmung der Dehnungsentwicklung bis April 1994 positive Tendenzen deutlich, die sich - unterbrochen durch eine Schwankung in negativer Richtung - bis zu einer Enddehnung von ca. 1,5 ‰ fortsetzen. Der Dehnungsverlauf der Körper D 37/D 38 steigt wie der an den homogen verfugten Fugen zu Beginn der Messungen steil auf ca. 4,2 ‰ an. Die horizontalen Mörtelfugen- sowie horizontalen und vertikalen Steindehnungen der Prüfkörper D 33/D 34 und D 37/D 38 verlaufen bis zum Abbau der Prüfkörper D 37/D 38 im April 1994 beinahe deckungsgleich mit geringen Schwankungen im negativen Bereich, wobei Werte zwischen - 0,5 ‰ und - 1,5 ‰ erreicht werden. Bis zum Ende der Messungen an den Prüfkörpern D 37/D 38 im September 1996 verlaufen die genannten Dehnungsentwicklungen überwiegend auf nahezu konstantem Niveau im negativen Bereich, wobei die Messungen am Stein Endwerte zwischen ca. - 0,8 ‰ und ca. - 1,3 ‰ erreichen, während die horizontale Mörtelfugendehnung bei Messungsende ca. - 1,8 ‰ beträgt.

Die mit den Mörtelsystemen *HGJ_{EL,S}* bzw. *HGQ_{EL,S}* unter Verwendung des Deckmörtels *Re* hergestellten unteren Fugen der Prüfkörper D 33/34 bzw. D 37/38 weisen horizontale Mörtelfugen- sowie horizontale und vertikale Steindehnungen auf, deren Verlauf dem an mit Deckmörtel *Re* verfugten mittleren Fugen festgestellt quantitativ gleicht. Das gleiche gilt für die vertikalen Mörtelfugendehnungen mit dem Unterschied, daß die Enddehnung mit ca. 2,3 ‰ etwas höher liegt als im Fall des Deckmörtels *Re*.

Die Prüfung einer Lufttemperaturabhängigkeit der Dehnungsverläufe erscheint aufgrund der punktuellen Dehnungsablesungen nicht sinnvoll und wird deshalb nicht durchgeführt.

8.2.3.3 Musterflächenuntersuchungen

Die an der mit $HGJ_{EL,R}$ verfugten Musterfläche ermittelten Verformungen sind auf den Seiten A26 und A27 dargestellt. Dabei wird unterschieden in Messungen, die *auf* Fugen erfolgten (S. A26) und solche, die *über* Fugen hinweg durchgeführt wurden (S. A27).

Die *auf den Fugen* ermittelten Dehnungen verlaufen nach anfänglichem flachem Anstieg bzw. Abfall über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu konstant auf niedrigem Niveau. Die *horizontal* gemessenen Werte (Meßstrecken 4 und 8) korrespondieren untereinander, wobei Meßstrecke 8 mit ca. 0,8 ‰ etwas höhere Dehnungen erfährt als Meßstrecke 4, an der während der gesamten Messungsdauer Dehnungen nahe Null ermittelt wurden. Dies bedeutet eine erhebliche Abweichung von den an den mittleren Fugen der Viersteinkörper D 33/D 34 gemessenen horizontalen Mörtelfugendehnungen, die mit bis zu - 2,2 ‰ Dehnung durchweg im negativen Bereich angesiedelt sind (siehe S. A 23). In *vertikaler* Richtung (Meßstrecken 1 und 5) sind an der Musterfläche ähnlich geringe Ergebnisse festzustellen wie in horizontaler Richtung. Hier liegen die gemessenen Dehnungen mit - 0,2 ‰ knapp unterhalb der Abszissenachse. Aufgrund meßtechnischer Probleme enden die Dehnungsaufnahmen über Meßstrecke 5 bereits im April 1995. Der über Meßstrecke 1 ab März 1995 festgestellte allmähliche Abfall der Dehnungswerte auf ca. - 0,3 ‰ könnte - verglichen mit den übrigen an der Musterfläche festgestellten Dehnungstendenzen - ebenfalls auf eine Fehlerhaftigkeit der Meßstelle hinweisen.

Auch die *über die Fugen hinweg* gemessenen Dehnungen sind, verglichen mit den am Dreisteinkörper D 21 (siehe S. A17) und an den Viersteinkörpern D 33/D 34 (siehe S. A23) ermittelten Werten, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung gering. Im Gegensatz zum *vertikalen* Fugendehnungsverlauf der Drei- und Viersteinkörper, die zunächst negative Dehnungstendenzen aufweisen und zum Ende hin positive Werte im Bereich von ca. + 1,6 ‰ bis ca. + 2 ‰ erreichen, treten an der Musterfläche, Meßstrecke 7, in vertikaler Richtung über die Fuge hinweg lediglich positive Dehnungen auf. Sie bleiben nach flachem Anstieg auf ca. + 1 ‰ im Dezember 1994 nahezu konstant. Die an Meßstrecke 3 ermittelten Werte liegen noch darunter und bewegen sich schwankend im Bereich von ca. + 0,2 ‰ bis ca. - 0,2 ‰. Die *horizontal* über die Fugen der Musterfläche (Meßstrecken 2 und 6) hinweg ermittelten Dehnungen erreichen ähnlich geringe Werte wie diejenigen in vertikaler Richtung.

Eine Temperaturabhängigkeit des Dehnungsverhaltens ist - auch aufgrund größerer meßsystembedingter Lücken im Verlauf der Lufttemperaturkurve - nicht festzustellen.

8.2.4 Freibewitterungsuntersuchungen an der Runneburg in Weißensee

8.2.4.1 Untersuchungen an Dreisteinkörpern

Die an den aus Thüringischem Travertin hergestellten Dreisteinkörpern T 2, T 3, T 5 und T 6 gemessenen Verformungen sind auf den Seiten A29 und A30 dargestellt.

Bei dem homogen bis zur Steinaußenfläche mit dem Mörtelsystem $HGJ_{EL,0}$ und bei dem unter Verwendung von Deckmörtel mit $HGJ_{EL,R}$ verfugten Prüfkörpern **T 2 und T 3** sind insgesamt positive vertikale *Mörtelfugenverformungen* mit Endwerten von jeweils ca. 1 ‰ im Juli 1996 zu erkennen. Die Steigung der Dehnungsverläufe ist bei beiden Prüfkörpern relativ gering. Prüfkörper T 2 zeichnet sich durch einen Verlauf aus, der bis zum Sommer 1995 im Bereich von ca. + 0,5 ‰ bis ca. - 0,5 ‰ schwankt, bevor im August 1995 eine starke Dehnungszunahme einsetzt und sich der Kurvenverlauf im positiven Bereich mit leichten Schwankungen bei ca. 1 ‰ fortsetzt. Die Mörtelfuge von Prüfkörper T 3 erfährt hingegen zunächst negative Dehnungen bis ca. - 0,3 ‰, die ebenfalls im August 1995 einen Sprung in positiver Richtung aufweisen und sich oberhalb der Abszissenachse bei leichter Steigung bis zum Enddehnungswert von ca. 1 ‰ fortsetzen. Es ist anzunehmen, daß die Kurvensprünge aus dem Einfluß erhöhter Lufttemperaturen im Hochsommer des Jahres 1995 herrühren. Darüber hinaus spielen Temperatureinflüsse nur eine geringe Rolle für die Dehnungsentwicklung der Mörtelfugen.

Die homogen bis zur Steinaußenfläche mit dem Mörtelsystem $HGZ_{RU,0}$ bzw. $HGZ_{EL,R}$ verfugten Prüfkörper **T 5 und T 6** zeigen ein abweichendes Bild. Die vertikale Mörtelfugenverformung des Körpers T 5 erreicht bei zunächst verhaltenem, dann mäßigem Anstieg des Dehnungsverlaufs mit einem bereits bei den Prüfkörpern T 2 und T 3 beobachteten Dehnungssprung im Hochsommer 1994 einen Endwert von ca. 4 ‰, während die Mörtelfugendehnungen von Prüfkörper T 6 während des Untersuchungszeitraums mit geringer Amplitude um die Abszissenachse schwankt. Zwischenzeitlich werden Mitte 1995 durch kapillare Austrocknung infolge sommerlicher Temperaturen negative Dehnungen von bis zu - 2 ‰ erreicht, bevor - wie im Fall der Prüfkörper T 2, T 3 und T 5 - ein Dehnungssprung in positiver Richtung die Tendenz des Kurvenverlaufs umkehrt. Auch hier spielen Lufttemperatureinflüsse darüber hinaus nur eine geringe Rolle für die Dehnungsentwicklung.

Steinverformungen wurden an Prüfkörper T 6 ermittelt. Die Ergebnisse zeigen ein Bild kontinuierlich auf sehr geringem Niveau bis zu einem Dehnungsendwert von ca. 0,2 ‰ im Juli 1996 zunehmenden Verformungen ohne nennenswerte Schwankungen. Ein Einfluß der Lufttemperatur ist nicht zu erkennen.

8.2.4.2 Musterflächenuntersuchungen

Die an der mit $HGZ_{RU,R}$ verfügbaren Musterfläche ermittelten Verformungen sind auf den Seiten A32 bis A34 dargestellt. Dabei wird in Messungen unterschieden, die auf Fugen (siehe S. A32), über Fugen hinweg (siehe S. A33) und auf dem Stein (siehe S. A34) erfolgten.

Die *auf den Fugen* ermittelten Dehnungen verlaufen während des gesamten Untersuchungszeitraums auf niedrigem Niveau. Die horizontal gemessenen Werte (Meßstrecken 4 und 8) korrespondieren untereinander weitgehend, wobei Meßstrecke 8 mit ca. 0,3 ‰ etwas geringere Enddehnungen erfährt als Meßstrecke 4 mit ca. 0,4 ‰. An Meßstrecke 8 sind nach einem flachen Dehnungsanstieg bis Mitte Juni 1996 und von da an nahezu konstantem Verlauf nur sehr geringfügige Schwankungen der Kurve festzustellen. Ein anderes Bild bietet Meßstrecke 4, deren zugehörige Dehnungsentwicklung bis zu ca. 1,8 ‰ aufweist. Hierin zeigen sich deutlich Auswirkungen der Gesteins- bzw. Mauerwerksinhomogenitäten. Aufgrund meßtechnischer Probleme endeten die horizontalen Messungen bereits im Dezember 1996. In vertikaler Richtung (Meßstrecken 1 und 5) sind an der Musterfläche geringere Dehnungsergebnisse festzustellen als in horizontaler Richtung. Hier liegen die gemessenen Dehnungen bei Messungsende mit + 0,4 ‰ (Meßstrecke 1) und - 0,2 ‰ (Meßstrecke 5) nahe der Abszissenachse. Aufgrund meßtechnischer Probleme endeten die Dehnungsaufnahmen über Meßstrecke 1 im Dezember 1996.

Auch die *über die Fugen hinweg* gemessenen Dehnungen sind relativ gering. Für die Messungen in vertikaler Richtung ist dies besonders im Vergleich mit den am Dreisteinkörper T 5 (siehe S. A30) ermittelten Werten zu erkennen. Im Gegensatz zum vertikalen Fugendehnungsverlauf des Dreisteinkörpers, der kontinuierlich bis auf ca. 4 ‰ anwächst, ist an der Musterfläche über Meßstrecke 3 ein Dehnungsverlauf sehr nahe der Abszissenachse, über Meßstrecke 7 nach anfänglich steilem Anstieg zunächst eine Stagnation, von August 1996 an ein Rückgang zu verzeichnen. Auch bei Extrapolation der an der Musterfläche gemessenen Dehnungswerte über einen dem Untersuchungszeitraum der Dreisteinkörper entsprechenden Zeitabschnitt wäre aufgrund der beobachteten Dehnungstendenzen kein deutliches Ansteigen zu erwarten. Die horizontal über die Fugen der Musterfläche

(Meßstrecken 2 und 6) hinweg ermittelten Dehnungen erreichen ähnlich geringe Werte wie diejenigen, die in vertikaler Richtung gemessen wurden.

Die gemessenen *Steindehnungen* erreichen während des gesamten Untersuchungszeitraums bei durchgehendem Verlauf im positiven Bereich und sehr geringem Anstieg einen Maximalwert von ca. 0,2 ‰.

Eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Dehnungsverhaltens ist nicht festzustellen. Lediglich im Winter 1996/97 zeigt sich ein Einfluß der sinkenden Lufttemperaturen auf alle zu diesem Zeitpunkt untersuchten Meßstrecken durch geringfügig absinkender Dehnungswerte.

8.3 Betrachtung von Zeitausschnitten mit Niederschlagsereignissen

8.3.1 Untersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried

Zur näheren Betrachtung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Dehnungsentwicklung des *HGZ* - Dolomitverbunds wurde ein Zeitausschnitt vom 14.05. bis 19.05.1993 mit einem Niederschlagsereignis am 15.05.1993 gewählt. In Bild 8.2 ist der in vertikaler Richtung an der Übungswand ermittelte Dehnungsverlauf in Gegenüberstellung mit den an Prüfkörper D 13 gemessenen Ergebnissen dargestellt. Zu erkennen ist neben der bereits im vorangegangenen Abschnitt erläuterten deutlichen Diskrepanz der Dehnungsverläufe von Musterfläche und Dreisteinkörper in beiden Fällen eine Reaktion beider Meßstrecken auf Temperaturschwankungen im Tag-Nachtwechsel. Dabei fällt auf, daß hohe Temperaturen am Dreisteinkörper Dehnungsabnahmen der Mörtelfugen zur Folge haben, während niedrige Temperaturen den umgekehrten Effekt nach sich ziehen. Dabei treten Schwingungsbreiten von ca. 0,5 ‰ auf. Auch an der Musterfläche sind Schwankungen des Dehnungsverlaufs im Tag-Nachtwechsel zu beobachten. Ihre Richtung ist jedoch den an Körper D 13 festgestellten entgegengesetzt: Steigende Lufttemperaturen haben positive, sinkende Lufttemperaturen negative Dehnungstendenzen zur Folge, wobei die Schwankungsbreite bei nur ca. 0,1 ‰ liegt. Ein Quellen und Schwinden des Verfugmörtels im Tag-Nachtwechsel als Ursache der an Körper D 13 ermittelten Dehnungsverläufe scheint fraglich. Hieraus kann - wenn man eine mögliche verzögerte „Dehnungsreaktion“ der Musterfläche auf Temperaturschwankungen außer acht läßt - geschlossen werden, daß sich dieses Verhalten vielmehr durch das Temperaturverhalten der rückseitig angebrachten Zwängungskonstruktion des

Prüfkörpers (siehe Bild 6.3) begründet. Deren Zugstangenverformungen kehren offensichtlich das natürliche Temperaturdehnungsverhalten an der Prüfkörpervorderseite um.

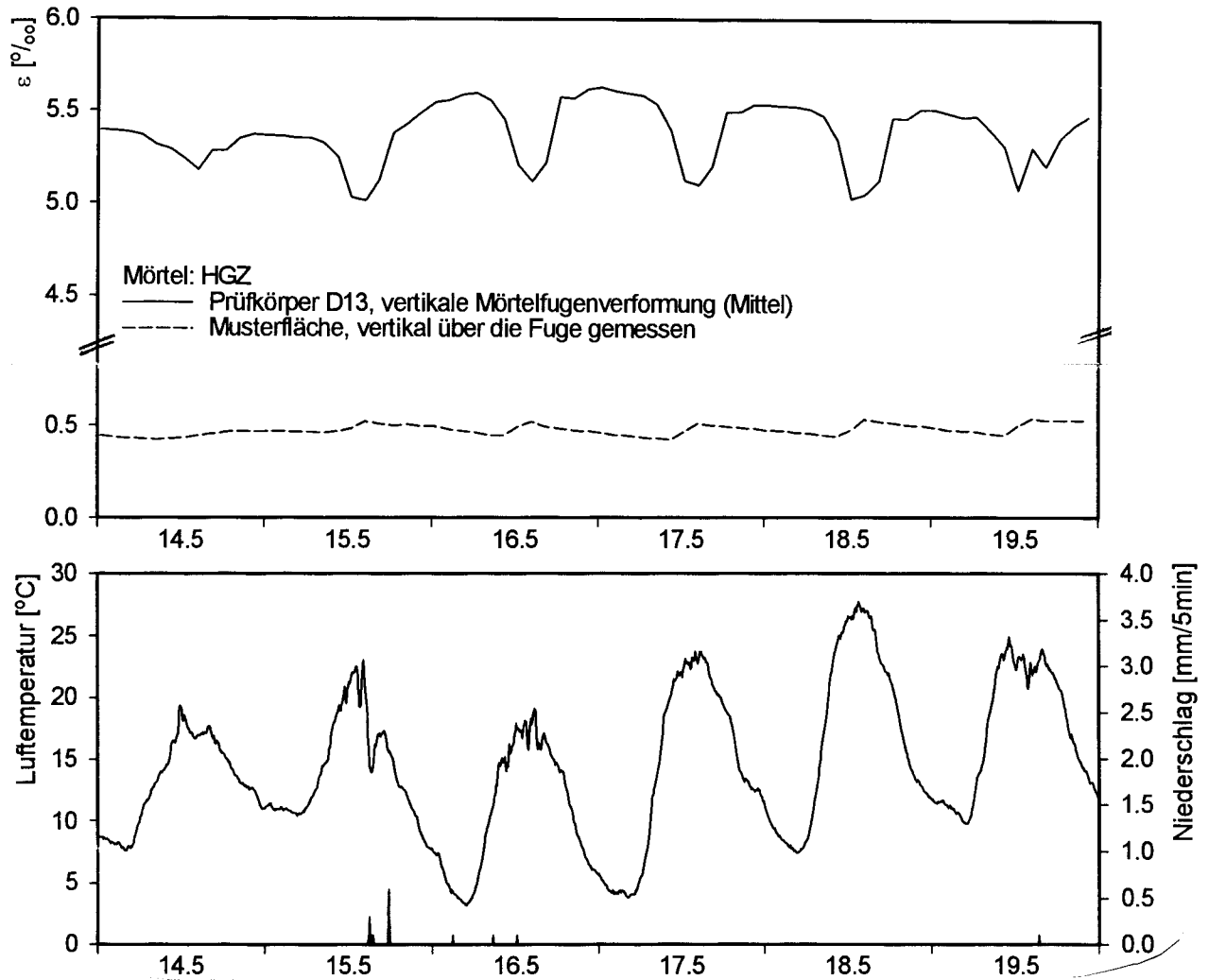


Bild 8.2: Untersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried, Dehnungsentwicklung 14.05. - 19.05.1993 mit Niederschlagsereignis

Es ist ein scheinbarer Einfluß der Niederschlagsereignisse am 15.05.1993 und der damit einhergehenden kurzzeitigen Temperaturschwankung auf die Dehnungsverläufe festzustellen. In der Folgezeit erhöht sich das Dehnungsniveau geringfügig. Bei Prüfkörper D 13 ist gleichzeitig eine Amplitudenvergrößerung auszumachen, die mit zunehmendem Zeitabstand vom letzten Regenereignis bei langsam wieder absinkendem Dehnungsniveau zurückgeht. Es ist jedoch zu beachten, daß der nach dem letzten Niederschlagsereignis zu beobachtende Lufttemperaturverlauf zunächst eine steigende, dann wieder abfallende Tendenz aufweist, was wiederum über die Zugstangenkonstruktion Einflüsse auf den Deh-

nungsverlauf an der Prüfkörpervorderseite erwarten läßt. Dementsprechend sehr gering fällt die an der Übungswand ermittelte „Dehnungsantwort“ aus.

8.3.2 Untersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich

Zur näheren Betrachtung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Dehnungsentwicklung des $HGJ_{EL,R}$ - Dolomitverbunds ist es erforderlich zwei Zeitausschnitte zu betrachten, da sich die Untersuchungen an der Musterfläche und dem mit dem gleichen Mörtel hergestellten Dreisteinkörper D 21 zeitlich zu wenig überschneiden. Um Entwicklungen an Mörteln etwa gleichen Alters vergleichen zu können, wurde im Fall des Dreisteinkörpers D 21 ein Zeitausschnitt vom 11.07. bis 16.07.1994 mit einem Niederschlagsereignis am 15.07.1994 gewählt, im Fall der Musterfläche ein Zeitausschnitt vom 11.07.1995 bis 14.07.1995 mit Niederschlagsereignissen am 12.07. und 14.07.1995. In Bild 8.3 und Bild 8.4 sind der in vertikaler Richtung an Prüfkörper D 21 ermittelte Dehnungsverlauf und die an der Musterfläche gemessenen Ergebnisse dargestellt.

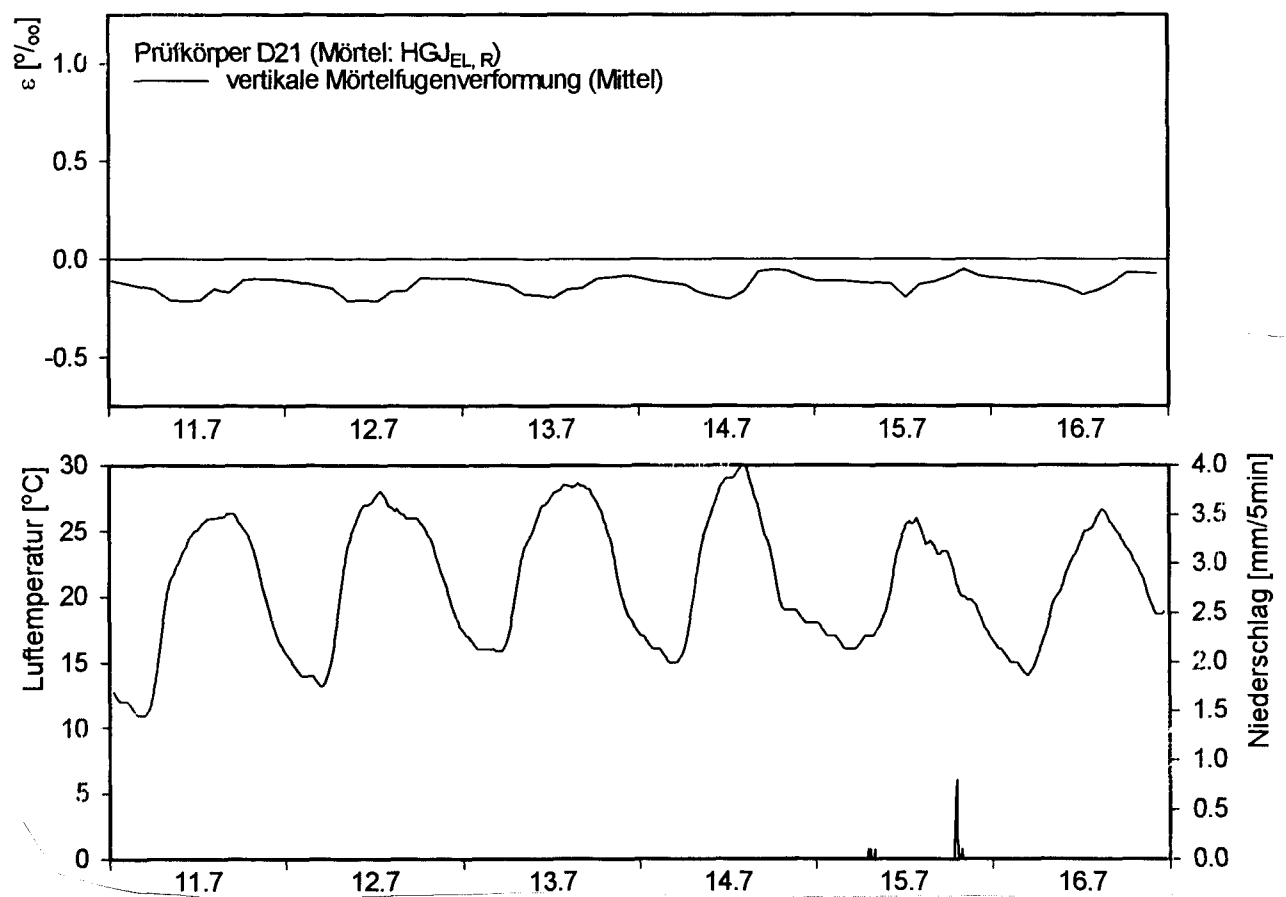


Bild 8.3: Untersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich, Dehnungsentwicklung an Dreisteinkörper D 21 11.07. - 16.07.1994 mit Niederschlagsereignis

Zu erkennen ist in beiden Fällen eine Reaktion der Meßstrecken auf Temperaturschwankungen im Tag-Nachtwechsel. Dabei fällt - wie bereits bei Untersuchungsergebnissen aus Walkenried - auf, daß hohe Temperaturen am Dreisteinkörper Dehnungsabnahmen der Mörtelfugen zur Folge haben, während niedrige Temperaturen den umgekehrten Effekt haben. Es treten Schwingungsbreiten von ca. 0,2 ‰ auf. Auch an der Musterfläche sind infolge von Temperaturwechseln im Tag-Nachtzyklus Schwingungen der Dehnungsverläufe zu erkennen. Ihre Richtung ist - anders als in Walkenried - mit den am Dreisteinkörper ein Jahr zuvor beobachteten Dehnungen gleichgerichtet, wobei die Schwankungsbreite bei ca. 0,25 ‰ liegt. Hieraus kann geschlossen werden, daß sich das Temperaturverhalten der rückseitig angebrachten Zwängungskonstruktion des Prüfkörpers (siehe Bild 6.3) in diesem Fall weniger stark bemerkbar macht.

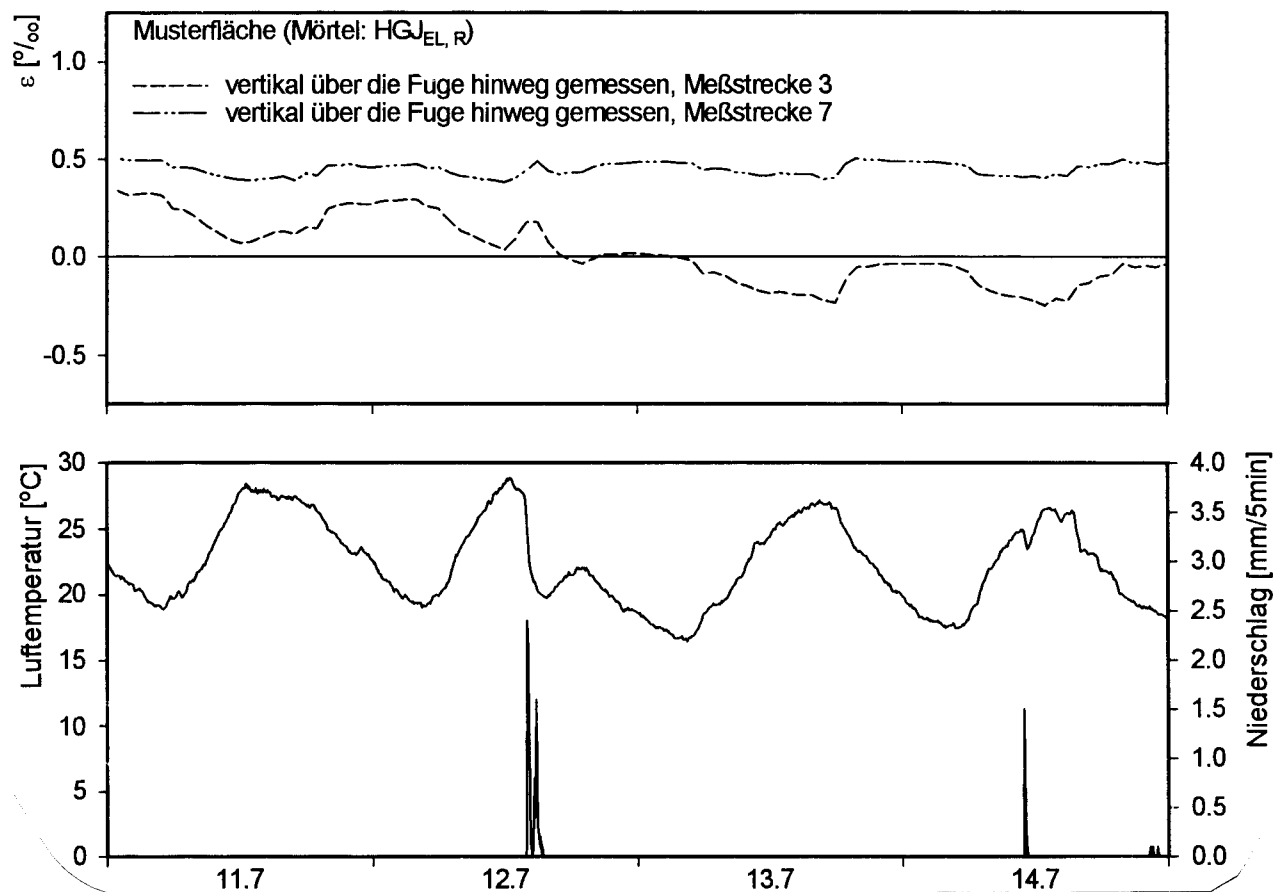


Bild 8.4: Untersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich, vertikale Dehnungsentwicklung an der *Musterfläche* 11.07. - 14.07.1995 mit Niederschlagsereignis

Anhand der Dehnungsdaten der *Musterfläche* ist ein deutlicher Einfluß des Niederschlagsereignisses vom 12.07.1995 und der damit einhergehenden kurzzeitigen Temperatur-

schwankung auf die Dehnungsverläufe festzustellen. In der unmittelbaren Folgezeit erhöhen sich die Dehnungsniveaus beider vertikaler Meßstrecken für die Dauer einiger Stunden um ca. 0,2 ‰ und es dauert etwa zwei Tage, bis sich das vor dem Niederschlagsereignis festzustellende Schwingungsverhalten der Dehnungskurve wieder eingestellt hat. Bei *Dreisteinkörper* D 21 sind infolge der beiden Niederschlagsereignisse am 15.07.1994 ebenfalls kurzzeitige Dehnungsänderungen auszumachen. Zunächst tritt eine negative, dann eine positive Dehnungstendenz auf, die jedoch mit Schwankungen von jeweils ca. 0,1 ‰ vergleichsweise gering ausfallen.

8.3.3 Untersuchungen an der Runneburg in Weißensee

Abweichend von den in Walkenried und Ellrich gemessenen Niederschlagswerten liegen für die Auswertung der an der Runneburg gemessenen Ergebnisse Schlagregenwerte vor. Zur näheren Betrachtung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Dehnungsentwicklung des *HGZ* - Dolomitverbunds wurde ein Zeitausschnitt vom 14.05. bis 19.05.1993 mit einem Schlagregenereignis am 15.05.1993 gewählt. In Bild 8.5 sind die in vertikaler Richtung an der Musterfläche ermittelten Dehnungsverläufe in Gegenüberstellung mit den vertikal an Prüfkörper T 5 gemessenen Ergebnissen dargestellt. Zu erkennen ist neben der bereits erläuterten Diskrepanz der Dehnungsverläufe von Musterfläche und *Dreisteinkörper* in beiden Fällen eine Reaktion der Meßstrecken auf Temperaturschwankungen im Tag-Nachtwechsel. Die Lufttemperaturen lagen nur als Tagesmittelwerte vor und sind als solche im Klimadiagramm dargestellt.

Es kann jedoch eine Schwingungsbreite im Tag-Nachtzyklus wie in Walkenried bzw. Ellrich unterstellt werden. Es fällt auf, daß sowohl bei der Musterfläche als auch beim *Dreisteinkörper* zur Mittagszeit hin ansteigende Lufttemperaturen negative und zur Nacht hin sinkende Lufttemperaturen positive Dehnungstendenzen zur Folge haben. Hieraus ist zu schließen, daß sich das Temperaturverhalten der rückseitig angebrachten Zwängungskonstruktion des Prüfkörpers in diesem Fall - wie bereits für die Untersuchungen in Ellrich festgestellt - weniger stark bemerkbar macht als in Walkenried.

Ein sichtbarer Einfluß des Schlagregenereignisses am 24.07.1996 auf die Dehnungsverläufe ist lediglich für die am Prüfkörper T 5 gemessenen Meßstrecken festzustellen. In der Folgezeit der Feuchteeinwirkung steigt die Dehnungskurve steiler als an den übrigen betrachteten Tagen an, wobei sich die Dehnungswerte jedoch im vorher beobachteten Rahmen bewegen.

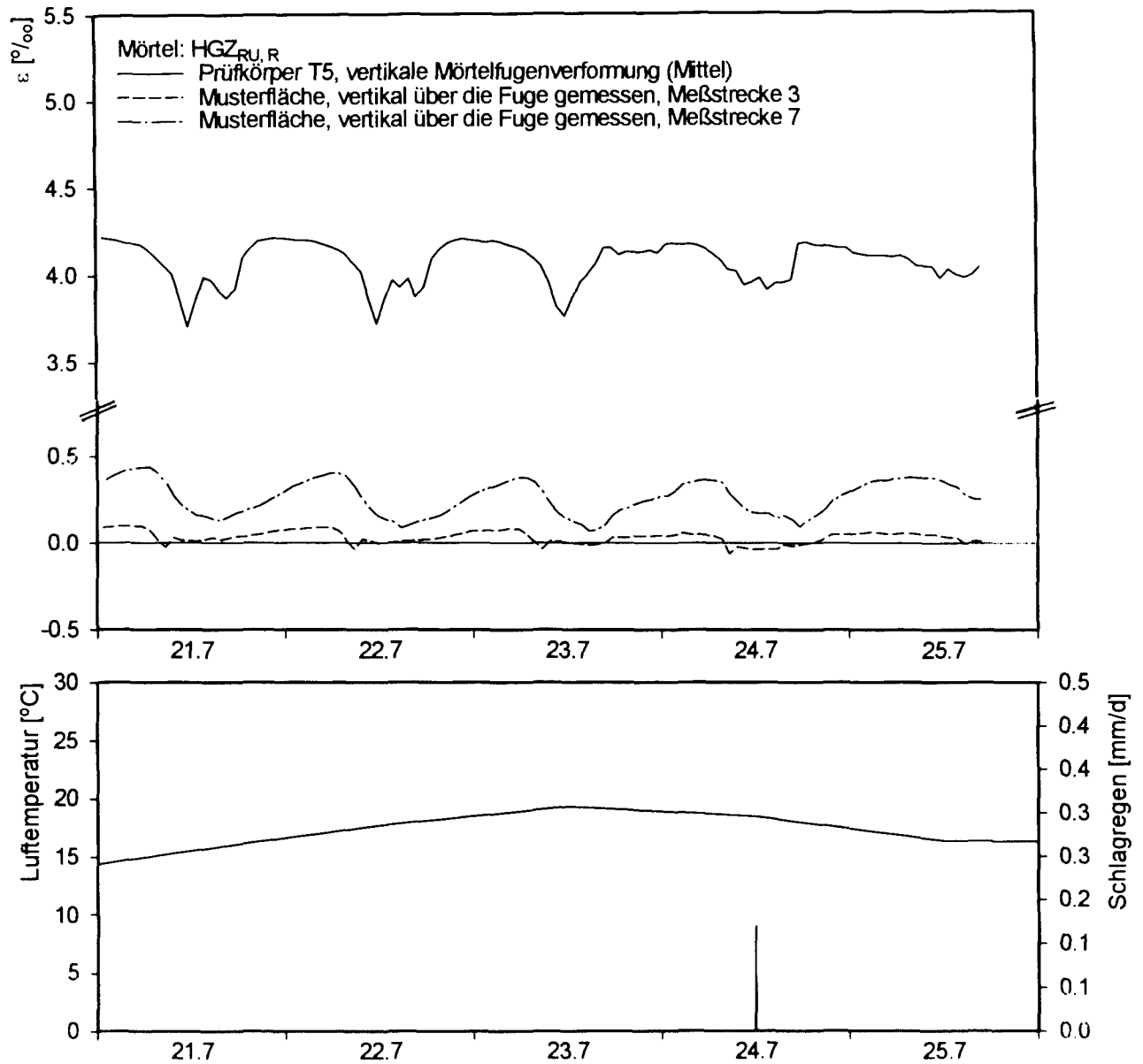


Bild 8.5: Untersuchungen an der Runneburg in Weißensee, Dehnungsentwicklung 21.07. - 25.07.1996 mit Schlagregenereignis

9 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit der Auswertung von Verformungen an verfugten Prüfkörpern und Musterflächen. Ziel der Ausarbeitung war es, anhand von Gegenüberstellungen Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit der eingesetzten Mörtelsysteme und Prüfkörper zu ziehen. Im Zeitraum von April 1992 bis Januar 1997 wurden Untersuchungen an bewitterten Drei- und Viersteinverbundprüfkörpern sowie Musterflächen durchgeführt. Als Pilotobjekte wurden zwei mit Gipsmörtel errichtete historische Gebäude aus Naturstein mit vielfach geschädigtem Mauerwerk gewählt; die Kirche St. Johannis in Ellrich und die Runneburg in Weißensee. Im Zuge der Mörteloptimierung erfolgten Voruntersuchungen an Prüfkörpern, Harzer Dolomit, Sander Schilfsandstein, Rühener Grünsandstein und Zwickauer Kohlesandstein, die künstlicher oder freier Bewitterung ausgesetzt wurden. Vor Anlegung der Musterfläche in Ellrich und Weißensee wurden Dreisteinprüfkörper ausgelagert. Die Ergebnisse flossen in die Mörteloptimierung der jeweiligen Pilotobjekte ein. Die an den Versuchsobjekten auftretenden Verformungsentwicklungen wurden mittels Setzdehnungsmessung und Induktiver Wegaufnahme sowie periodischer Rißaufnahme dokumentiert. Begleitend erfolgten Klimamessungen. Auf Basis eines vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung entwickelten faserbewehrten Mörtels *HGZ* wurden je nach Einsatzart die Varianten *HGZ_{RU}*, *HGJ_{um}*, *HGJ_{EL}*, *HGQ_{um}* und *HGQ_{EL}* entwickelt. Darüber hinaus wurde ein marktgängiger Sanierputz *Re* und ein, von der Gesamthochschule Siegen entwickelter, Mörtel *Si* erprobt. Sie wurden zusätzlich auf ihre Eignung als Fugendeckmörtel untersucht. Verformungsänderungen abhängig von Lufttemperatur und Niederschlag wurden ausgewertet. Messungen an Verbundprüfkörpern und Musterflächen, hergestellt aus gleichen Natursteinen und Mörtelsystemen, wurden gegenübergestellt.

Bei den Voruntersuchungen unter **freier Bewitterung an der MPA Braunschweig** zeigten sich vertikal über die Mörtelfugen hinweg stetig zunehmende Dehnungen. Dabei wiesen die mit *HGJ_{um}* und Sanierputz *Re* hergestellten Mörtelfugen in vertikaler Richtung tendenziell geringeres Quellbestreben als die *HGZ*-Fugen auf. Zusammenhänge zwischen Dehnungen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen konnten nur in geringem Maß festgestellt werden. An den Fugen der Prüfkörper aus *Sander Schilfsandstein* konnten bereits unmittelbar nach Messungsbeginn starke Dehnungen beobachtet werden. Im Wechselspiel von Stein- und Fugenmaterial ist ein gegenläufiges Dehnungsverhalten zu beobachten, das auf ein Nachgeben des Steins gegenüber dem Verformungsbestreben des quellzementhaltigen Mörtels hindeutet. An Körpern aus *Rühener Grünsandstein* war zu Beginn der vertikalen Messungen an Mörtelfugen ebenfalls eine sprunghafte Dehnungszunahme

festzustellen. Die beobachteten Dehnungen fallen dabei gegenüber den an Sander Schilfsandstein ermittelten Werten niedriger aus. Die *HGZ*-Mörtelfugen der Dreisteinkörper aus *Harzer Dolomit* erfuhren von Beginn an konstant steigende positive Vertikaldehnungen ohne deutliche Schwankungen. Geringe Verformungen zeigten die *HGJ_{um}*-Mörtelfugen und die Fugen aus *Sanierputz Re*.

An den Dreisteinkörpern in *Walkenried* wurden positive vertikale Dehnungsverläufe mit geringen Schwankungen beobachtet. Die Dehnungsentwicklungen an *HGZ*- und *HGJ_{um}*-Mörtelfugen ähnelten sich qualitativ. Der *HGJ_{um}*-Mörtel zeigte dabei stärkere Anfangsverformungen und ein früheres Abflachen der Kurve, während die *HGZ*-Mörtelfuge von Beginn bis zum Ende der Messungen ein fast lineares Dehnungsverhalten aufwies. Die Mörtelfuge aus *Sanierputz Re* wies ein viel geringeres Quellbestreben auf. Eine deutliche Reaktion der Dehnungen auf Temperaturschwankungen ist bei den Dreisteinkörpern und an der Musterfläche zu erkennen. Hohe Temperaturen am betrachteten Dreisteinkörper hatten Stauchungen in den Mörtelfugen zur Folge. Die Verformungen bei der Musterfläche verliefen jedoch umgekehrt. Die Reaktion des Dreisteinkörpers wurde auf die Temperaturdehnung der rückseitig angebrachten Zwängungskonstruktion zurückgeführt. Regenereignisse zeigen keinen Einfluß auf die Dehnungsverläufe.

In *Ellrich* wurden Untersuchungen an Harzer Dolomit mit den Mörtelsystemen *HGJ_{EL,0}* bzw. *HGQ_{EL,0}* durchgeführt. An den *Dreisteinkörpern* konnten positive Tendenzen der vertikalen Mörtelfugenverformung festgestellt werden. Das *HGQ_{EL,0}*-Mörtelsystem quoll im Anfangsstadium stärker als der *HGJ_{EL,0}*-Mörtel, bei dem letzteren war ein kontinuierlicher Anstieg in den ersten Monaten zu beobachten. Die, unter Verwendung von Deckmörtel aus *Sanierputz Re* mit den Mörtelsystemen *HGJ_{EL,R}* bzw. *HGQ_{EL,R}* verfugten, Prüfkörper zeigten erheblich geringere vertikale Mörtelfugenverformungen. Nach Beginn der Messungen traten zunächst negative Dehnungen auf. Es konnte ein deutliches Quellen des *HGQ_{EL,R}*-Mörtelsystems bei geringen Lufttemperaturen beobachtet werden, während das *HGJ_{EL,R}*-System erst bei sommerlichen Temperaturen zu quellen begann. Die vertikalen *HGQ_{EL,S}*-Mörtelfugenverformungen erreichten nach starker Anfangsverformung in den ersten Untersuchungswochen ein Vielfaches der an *HGJ_{EL,S}*-Mörtelfugen.

Die festgestellten *horizontalen* Fugendehnungen waren geringer. Dabei schwankte die *HGJ_{EL,0}*-Fugendehnung um die Abszissenachse, während die an *HGQ_{EL,0}*-Fugen ermittelte stets positiv blieb. Gleiche Verformungen wurden an Prüfkörpern mit und ohne Deckmörtel aufgezeichnet.

Auf den Fugen wurden nach anfänglich flachem Anstieg bzw. Abfall über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu konstant geringe Dehnungen beobachtet. Eine erhebliche Abweichung zeigen die horizontalen Fugendehnungen der Viersteinkörper. Sie lagen durchweg im negativen Bereich.

Wie in Walkenried wiesen die Dehnungen an der Musterfläche eine deutliche Reaktion bei Temperaturschwankungen auf. Dabei zeigten die Dreisteinkörper gleiche Dehnungstendenzen. Sowohl am Dreisteinkörper als auch an der Musterfläche wurden Reaktionen der vertikalen Mörtelfugendehnungen infolge eines eintretenden Regenereignisses festgestellt. Der am Dreisteinkörper gemessene Dehnungsverlauf schwankte für die Dauer einiger Tage geringfügig, während an der Musterfläche kurzzeitige Dehnungszunahmen zu verzeichnen waren.

In *Weißensee* wurden Untersuchungen an Travertin durchgeführt. Es konnten geringe positive Verformungen bei, mit Mörtelsystem $HGJ_{EL,0}$ und $HGJ_{EL,R}$ verfugten, *Dreisteinkörpern* festgestellt werden. Im Sommer zeigte sich jedoch bei den $HGJ_{EL,0}$ und $HGJ_{EL,R}$ - Mörtelfugen ein sprunghafter Anstieg. Die bis zur Steinaußenfläche mit dem Mörtelsystem $HGZ_{RU,0}$ bzw. $HGZ_{EL,R}$ verfugten Prüfkörper zeigten ein abweichendes Bild. Zunächst stiegen die vertikalen $HGZ_{EL,R}$ -Mörtelfugendehnungen an. Im Sommer folgte ein Dehnungssprung. An der *Musterfläche* zeigten sich geringe Verformungen. Im Gegensatz zum vertikalen Fugendehnungsverlauf des zugehörigen Dreisteinkörpers, der kontinuierlich anwuchs, war an der Musterfläche einerseits ein Dehnungsverlauf sehr nahe der Abszissenachse, andererseits nach steilem Anstieg eine Stagnation mit anschließendem Rückgang zu verzeichnen. Eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Dehnungsverhaltens konnte nicht festgestellt werden. Lediglich im Winter 1996/97 war ein Einfluß sinkender Lufttemperaturen auf alle untersuchten Meßstrecken in Form geringfügig absinkender Dehnungswerte festzustellen.

Die Untersuchungen zeigen, daß bei „gleichartigen“ Prüfkörpern abweichende Dehnungsergebnisse nicht untypisch sind. Dies ist bei Betrachtung von Natursteinen, deren Eigenschaften schwerlich normierbar sind, zu erwarten. Über die Problematik unterschiedlicher Meßstrecken sind direkte quantitative Vergleiche von Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Meßverfahren ermittelt wurden, nur bedingt möglich. Offensichtlich modelliert die für Drei- und Viersteinkörper verwendete Zwängungskonstruktion den komplexen individuellen Zwängungszustand in Natursteinmauerwerk nur näherungsweise. Anhand kurzer Zeitausschnitte des Dehnungsverhaltens deutet sich an, daß von einem nicht unerheblichen Temperatur- und Relaxationseinfluß auf die Zugstangenkonstruktion der Prüfkörper auszu-

gehen ist. Hierdurch kommt es zu Dehnungseinflüssen, die bei Musterflächen nicht auftreten. Erheblich umfangreichere Untersuchungsreihen sind hierzu notwendig.

10 Literatur

- /1/ Beecken, C.: Vergleich zweier Verformungsmeßmethoden an bewitterten Naturstein-Mörtel-Verbundprüfkörpern : Entwurf in der Vertiefungsrichtung Baustofftechnologie. Braunschweig: Technische Universität, September 1995, unveröffentlicht
- /2/ Budelmann, H. ; Weiß, D. ; Rostásy, F. S.: Der Verbund zwischen Fugenmörtel und Naturstein - Anforderungen und Prüfung. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung : Materials Science and Restoration, Band 2, F. H. Wittmann (Hrsg.). Ehningen bei Böblingen: expert-Verlag, 1993, S. 1081 - 1091
- /3/ Burkhardt, B.: Dokumentation und Maßnahmenkatalog zur Erhaltung und Wiederherstellung der St. Johannis Kirche in Ellrich : Entwurf : TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Förderkreis zum Wiederaufbau der St. Johannis Kirche in Ellrich e. V. Braunschweig: April 1991
- /4/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 18555, Teil 6 : Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln : Festmörtel : Bestimmung der Haftzugfestigkeit. Berlin: Beuth, 1987
- /5/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 52103 : Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen : Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. Berlin: Beuth, Oktober 1988
- /6/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 52105 : Prüfung von Naturstein : Druckversuch. Berlin: Beuth, August 1988
- /7/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 52112 : Prüfung von Naturstein : Biegeversuch. Berlin: Beuth, August 1988
- /8/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 52617 : Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Berlin: Beuth, Mai 1987
- /9/ Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN EN 196-1 : Prüfverfahren für Zement: Bestimmung der Festigkeit. Berlin: Beuth, März 1990
- /10/ Erbaydar, S.: Einfluß von Abbindesteuernenden Zusatzmitteln auf die HGZ-Hydratation sowie Untersuchungen über alternative Bindemittelsysteme auf Basis von Hüttensand-Tonerdezement bzw. Hüttensand-Schnellzement. Interner WKI-Bericht Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig. Braunschweig: WKI, Februar 1992, unveröffentlicht
- /11/ Erbaydar, S.: Faserstopfmörtel zur Bausanierung : Sulfatisch /basisch angeregte quellfähige Mörtelsysteme mit Cellulosefasern. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung : Materials Science and Restoration, Band 2, F. H. Wittmann (Hrsg.). Ehningen bei Böblingen: expert-Verlag, 1993

- /12/ Erbaydar, S.: Hydratation des Hüttensandes im HGZ. Interner WKI-Bericht Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig. Braunschweig: WKI, Mai 1991, unveröffentlicht
- /13/ Erbaydar, S.: Rezepturoptimierung und -modifizierung von „sulfatisch/basisch angeregten Bindemittelsystemen“ mit und ohne Zusätzen. WKI-Berichte Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig, Teile 1 - 8. Braunschweig: WKI, 1992, unveröffentlicht
- /14/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. München: Verlag Karl M. Lipp, 1990
- /15/ GUD Ingenieurbüro Leipzig: Bericht über die Baugrund- und Gründungsverhältnisse für den Wiederaufbau der St. Johanniskirche in Ellrich : Nr. G: 01-92. Leipzig: GUD-Ingenieurbüro, Januar 1992
- /16/ Hohl, R. (Hrsg.): Die Entwicklungsgeschichte der Erde. Leipzig: VEB F. A. Brockhaus, 1981, S. 87, S. 556
- /17/ Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH: Bedienungsanleitung zum Induktiven Wegaufnehmer W2AK. Darmstadt: Hottinger Baldwin, 1990
- /18/ Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH: Bedienungsanleitung zum Setz-Dehnungsmeßgerät DD 1. Darmstadt: Hottinger Baldwin, 1991
- /19/ Jubelt, R. ; Schreiter, P.: Gesteinsbestimmungsbuch. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982, S. 186
- /20/ Kirchschrager, M. ; Stolle, T.: Die Runneburg in Weißensee - Eine der mittelalterlichen Residenzen der Landgrafen von Thüringen. IfBuG Baumgarten und Partner. Erfurt/Leipzig: IfBuG, 1994
- /21/ Knöfel, D. ; Schubert, P.: Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege. Berlin: Verlag Ernst u. Sohn, 1993
- /22/ Kutschke, D. ; Grunert, S.: Zwickauer Kohlesandstein : Zusammenstellung von Grunddaten (Kurzfassung). Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden. Dresden: TU, Februar 1994, unveröffentlicht
- /23/ Lucas, H. G.: Gips als historischer Außenbaustoff in der Windsheimer Bucht : Verbreitung, Gewinnung und Beständigkeit im Vergleich zu anderen örtlichen Naturwerksteinen. Dissertation an der RWTH Aachen. Aachen: RWTH, 1992
- /24/ Menzel, U.: Gesteinstechnische Kennwerte des Zwickauer Kohlesandsteins. Untersuchungsbericht des Instituts für Tragwerke und Baustoffe der Technischen Universität Dresden. Dresden: TU, Januar 1994, unveröffentlicht
- /25/ Mielke, I. ; Herbach, D.: BMFT-Pilotprojekt Runneburg Weißensee/Thüringen : 2. Zwischenbericht HAB Weimar. Weimar: HAB, Dezember 1993, unveröffentlicht

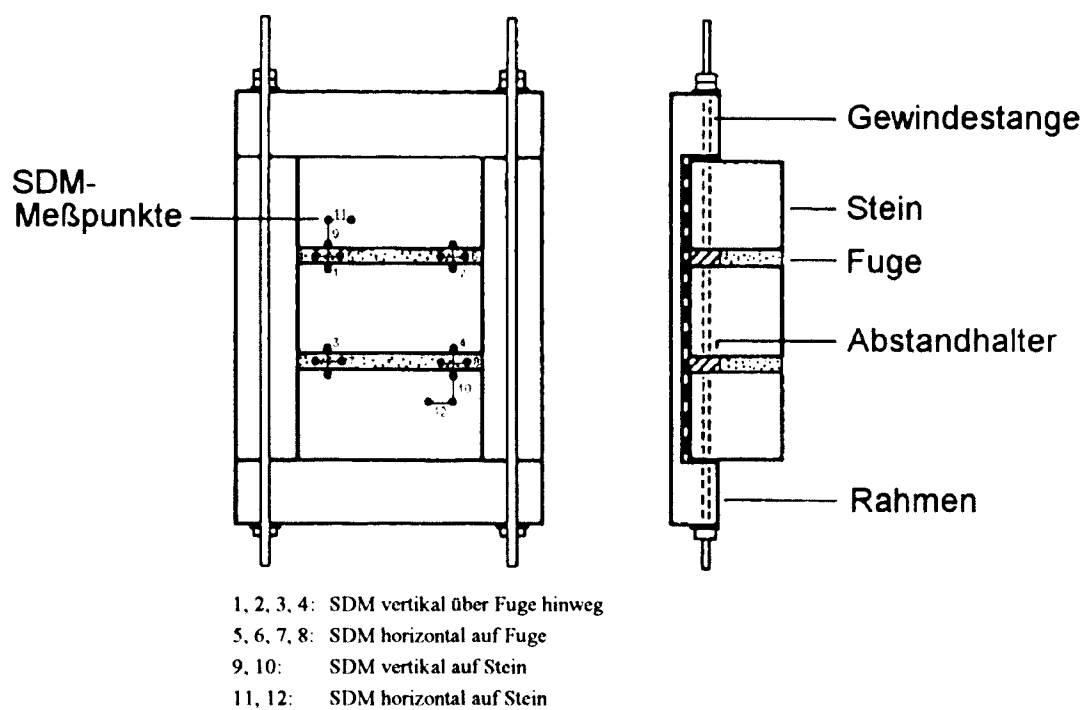
- /26/ Mielke, I. ; Stürmer, S. ; Herbach, D.: BMFT-Pilotprojekt Runneburg Weißensee/Thüringen : Abschlußbericht HAB Weimar. Weimar: HAB, Juni 1993, unveröffentlicht
- /27/ Mielke, I.: BMFT-Pilotprojekt Runneburg Weißensee/Thüringen : 1. Zwischenbericht HAB Weimar. Weimar: HAB, August 1993, unveröffentlicht
- /28/ MPA Bremen (Hrsg.): 1. Orientierungsuntersuchung der St. Johannis Kirche in Ellrich vom 17.02 - 19.02.1992. Bremen: MPA, Februar 1992, unveröffentlicht
- /29/ Müller, F.: Gesteinskunde. Ulm: Erber-Verlag, 1984
- /30/ Piepenburg, W.: Mörtel, Mauerwerk, Putz. Wiesbaden: Bauverlag, 1969
- /31/ Polster, H. ; Hoffmann, D.: Untersuchungsbericht Nr. 06.93 zu Ergebnissen der Verträglichkeitsuntersuchungen an Hüttensand-Gips-Bindemittelsystemen. Berlin: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken (IEMB), Februar 1993
- /32/ Reinsch, D.: Natursteinkunde. Stuttgart: Verlag Ferdinand Enke, 1991
- /33/ Rinne, A. ; Marzaganov, R. ; Rostásy, F. S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Naturstein unter Bewitterung : Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen beim Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig. Braunschweig: MPA, November 1994, unveröffentlicht
- /34/ Rinne, A. ; Rostásy, F. S.: Fugeninstandsetzung an der Runneburg in Weißensee/Thüringen : Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen beim Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig. Braunschweig: MPA , Dezember 1996, unveröffentlicht
- /35/ Rinne, A. ; Rostásy, F. S.: Zur Neuverfugung an der St. Johannis Kirche in Ellrich : Berichte zu Denkmalpflege-Forschung. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen beim Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig. Braunschweig: MPA, März 1995, unveröffentlicht
- /36/ Sattler, H.: Eignung von Lignocellulosefasern als Asbestersatz. In: Bausanierung (1993), Heft 3
- /37/ Sattler, H.: HGZ-Fasermörtel für die Fugensanierung : Anwendungsvorteile und -grenzen. Bauwirtschaftliche Informationen, Fulda, November 1993
- /38/ Stolle, T. ; Jäger, H.: Denkmalpflegerische Zielsetzung der Runneburg in Weißensee, Kreis Sömmerda. Protokoll, 02.12.1993, unveröffentlicht
- /39/ Stolle, T. ; Kirchschrager, M.: Die Runneburg in Weißensee - Eine mittelalterliche Pfalz der Thüringer Landgrafen (informeller Bericht). In: Burgen und Schlösser, Sonderheft 1991, S. 4 - 14

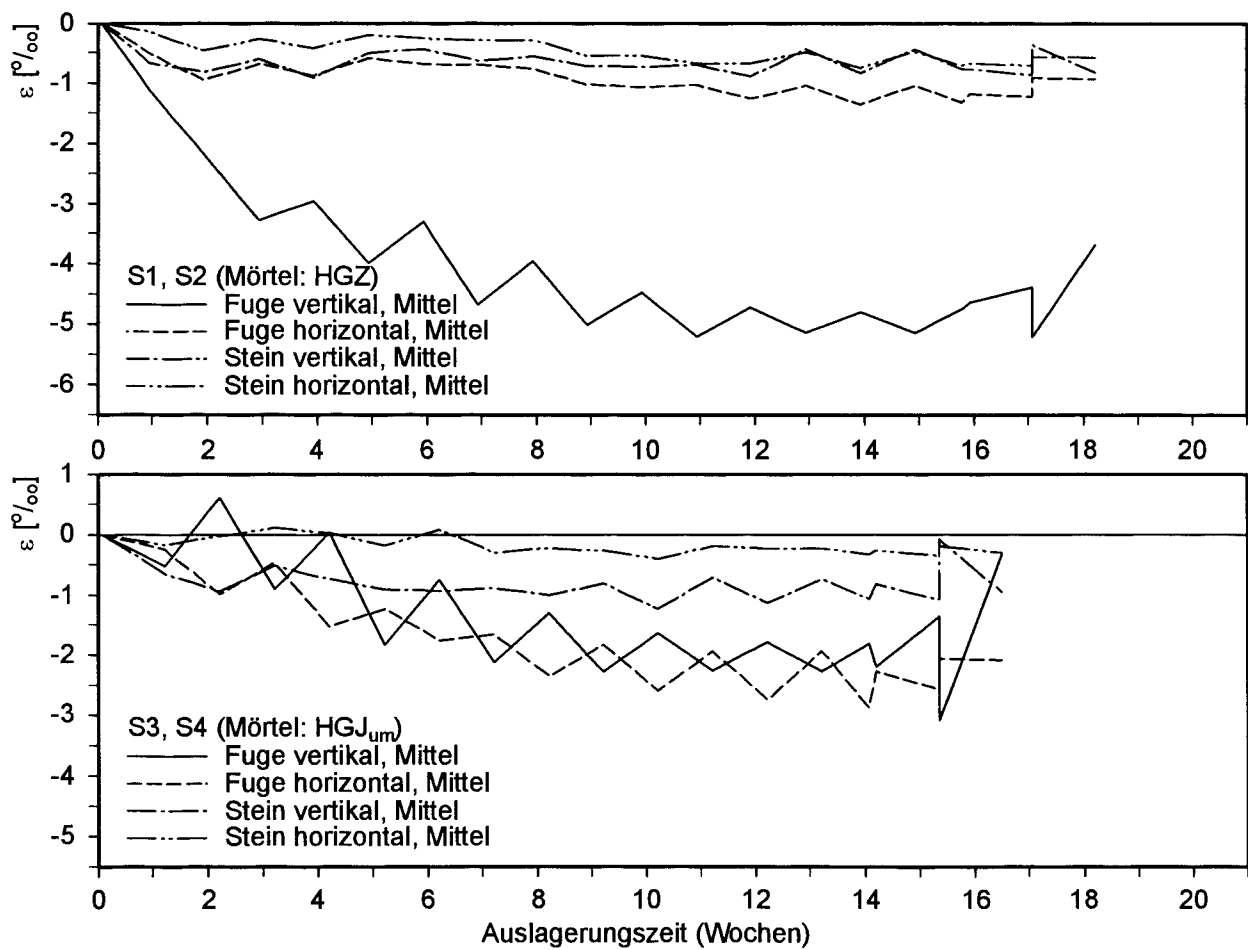
- /40/ Thüringisches Amt für Denkmalpflege: Projektskizze für Forschung und Entwicklung im Rahmen der vom BMFT geförderten Denkmalpflege-Forschung : Pilotobjekt St. Johanniskirche : Teil 1. Fulda, November 1992
- /41/ Verein zur Rettung und Erhaltung der Runneburg in Weißensee/Thüringen (Hrsg.): Festschrift zur 825-Jahrfeier der Runneburg in Weißensee. Schriftenreihe des Vereins zur Rettung und Erhaltung der Runneburg in Weißensee/Thüringen. Heft 2 (1993)
- /42/ Warnecke, P. ; Schwick, U.; Rostásy, F. S.: Untersuchungsbericht Nr. 4095/2021 : Chemisch-mineralogische Untersuchungen an Mörtel und Mauersteinen der Kirche St. Johannis. Braunschweig: MPA, 22.04.1992, unveröffentlicht
- /43/ Warscheid, T.: Zwischenbericht zu den mikrobiologischen Untersuchungen an HGZ-Fasermörteln. Labor Bode-Warscheid, 1994, unveröffentlicht
- /44/ Weiß, D. ; Rostásy, F. S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Natursteinen : Forschungsbericht. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen beim Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig. Braunschweig: MPA, März 1992, unveröffentlicht
- /45/ Wigger, H. ; Warnecke, P. ; Rostásy, F. S.: 1. Zwischenbericht zu Untersuchungen an der St. Johanniskirche in Ellrich : Bericht Nr. 8023/8424-1. Braunschweig: MPA, März 1994, unveröffentlicht
- /46/ Wigger, H.: Zur Praxiserprobung von HGZ-Faserstopfmörtel. Referat anlässlich des BMFT-Workshops „Mörtel in der Denkmalpflege“, Künzell 27./28. April 1993. Fulda: Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege (Redaktion), 1993, unveröffentlicht
- /47/ Zelger, C.: Verformungsmessungen an Brücken. In: Stahlbetonbau : Berichte aus Forschung und Praxis : Hubert Rüsch gewidmet. Berlin 1969, S. 217 - 225

Anhang

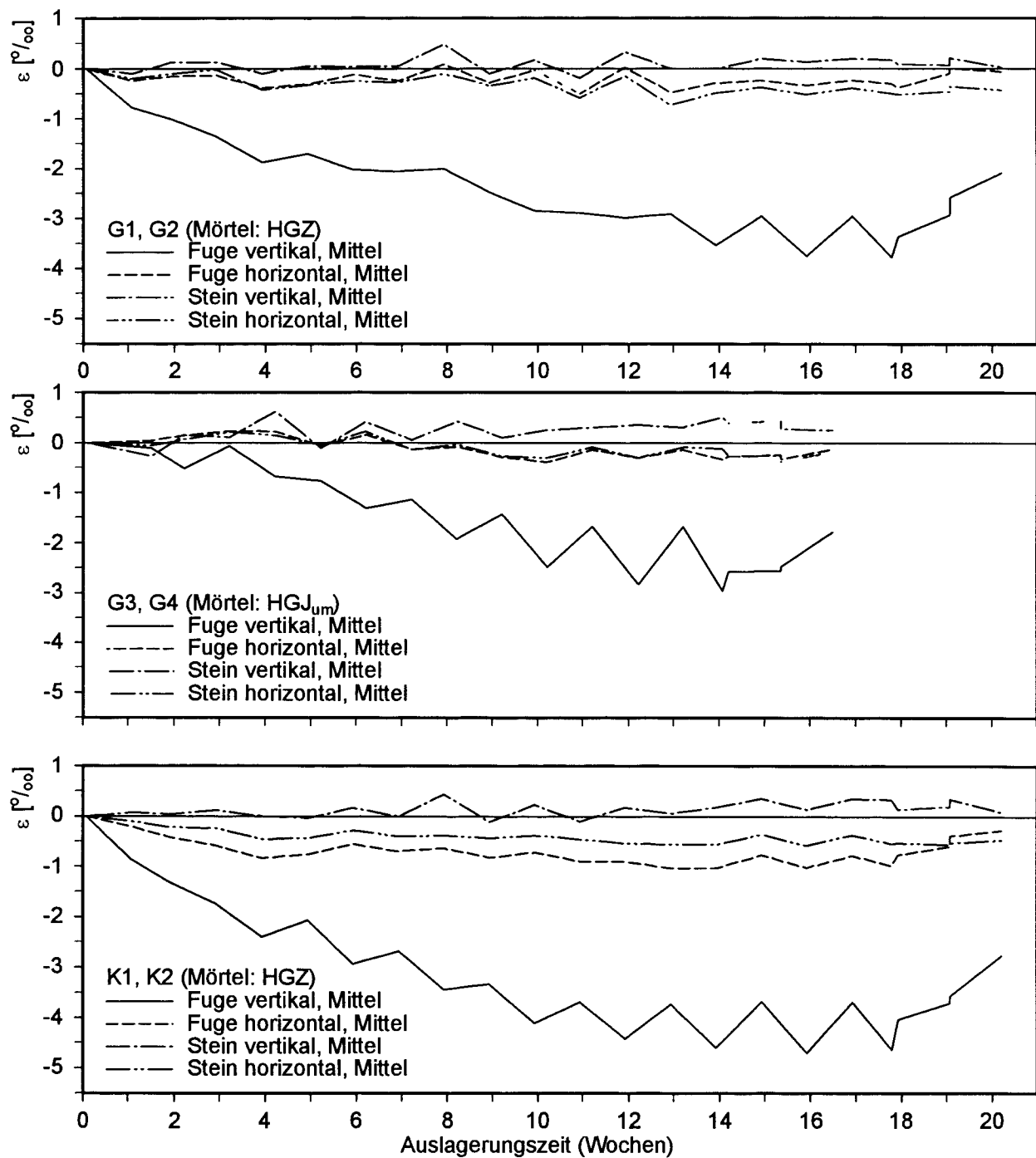
Verformungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig, Klimakammer.....	A1
Verformungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig, Freibewitterung.....	A5
Verformungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried	A9
Dreisteinkörper.....	A9
Musterfläche.....	A11
Verformungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich.....	A13
Dreisteinkörper.....	A13
Viersteinkörper.....	A19
Musterfläche.....	A25
Verformungsuntersuchungen an der Runneburg Weißensee	A28
Dreisteinkörper.....	A28
Musterfläche.....	A31

Verformungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig (Klimakammer) Dreisteinkörper

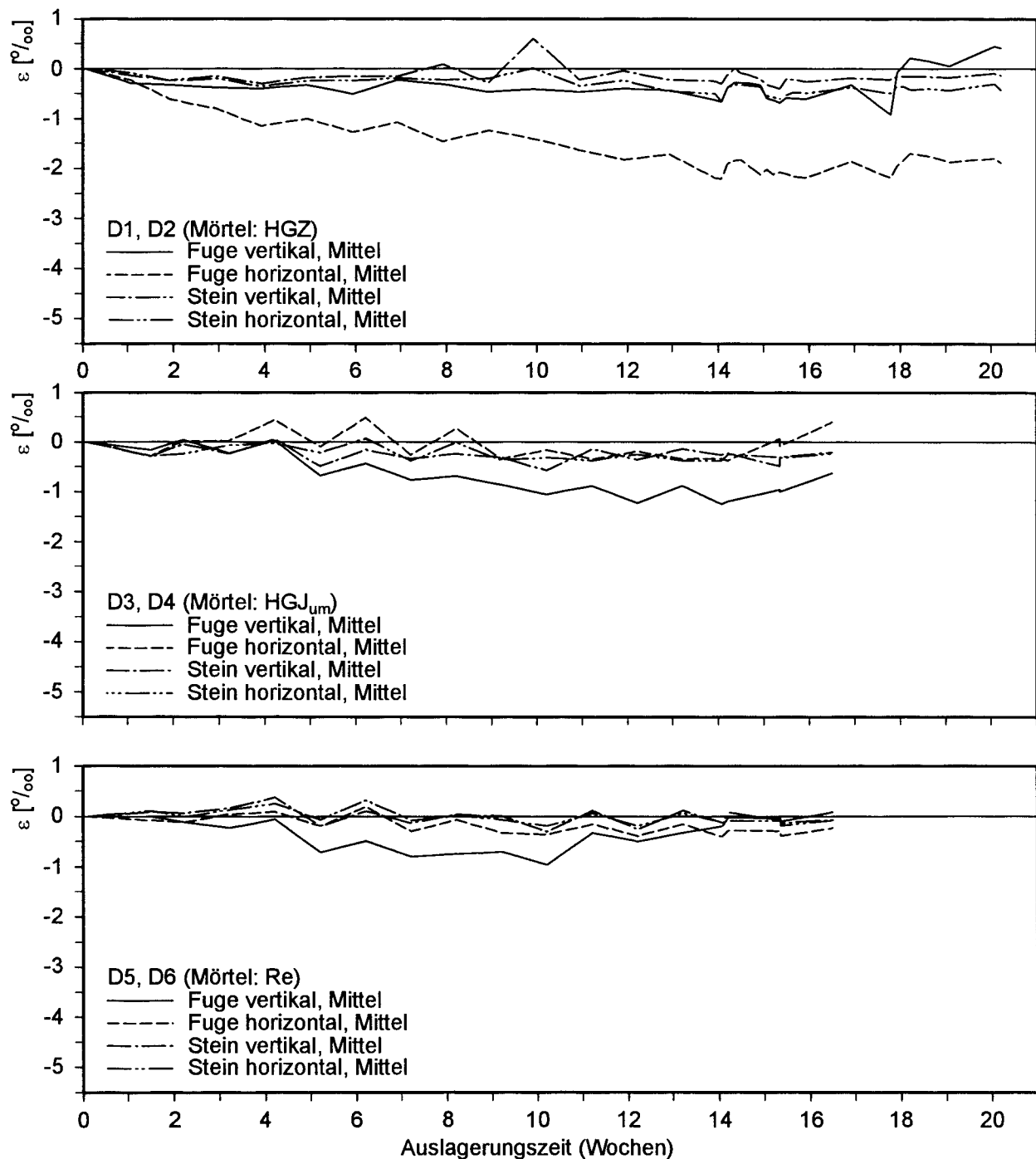




Klimakammer MPA Braunschweig
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Dreisteinkörpern aus Sander Schilfsandstein
 April bis September 1992
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

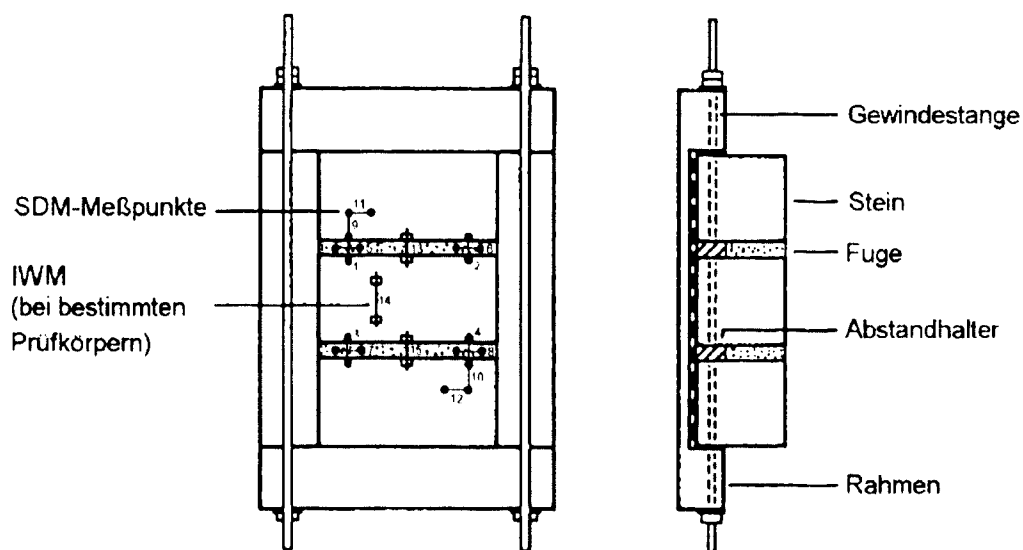


Klimakammer MPA Braunschweig
Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Dreisteinkörpern
aus Rüthener Grünsandstein und Zwickauer Kohlesandstein
April bis September 1992
Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

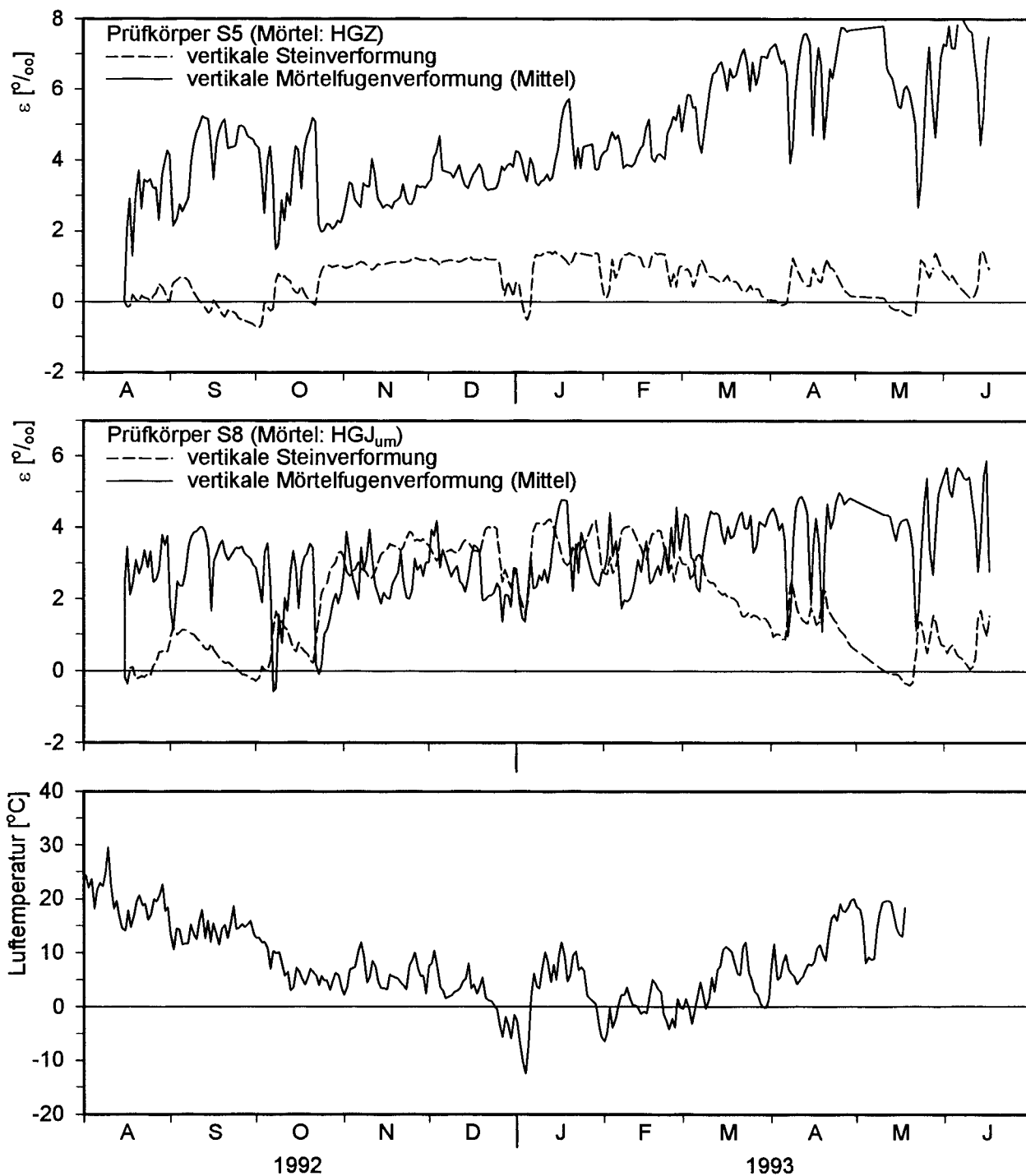


Klimakammer MPA Braunschweig
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 April bis September 1992
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

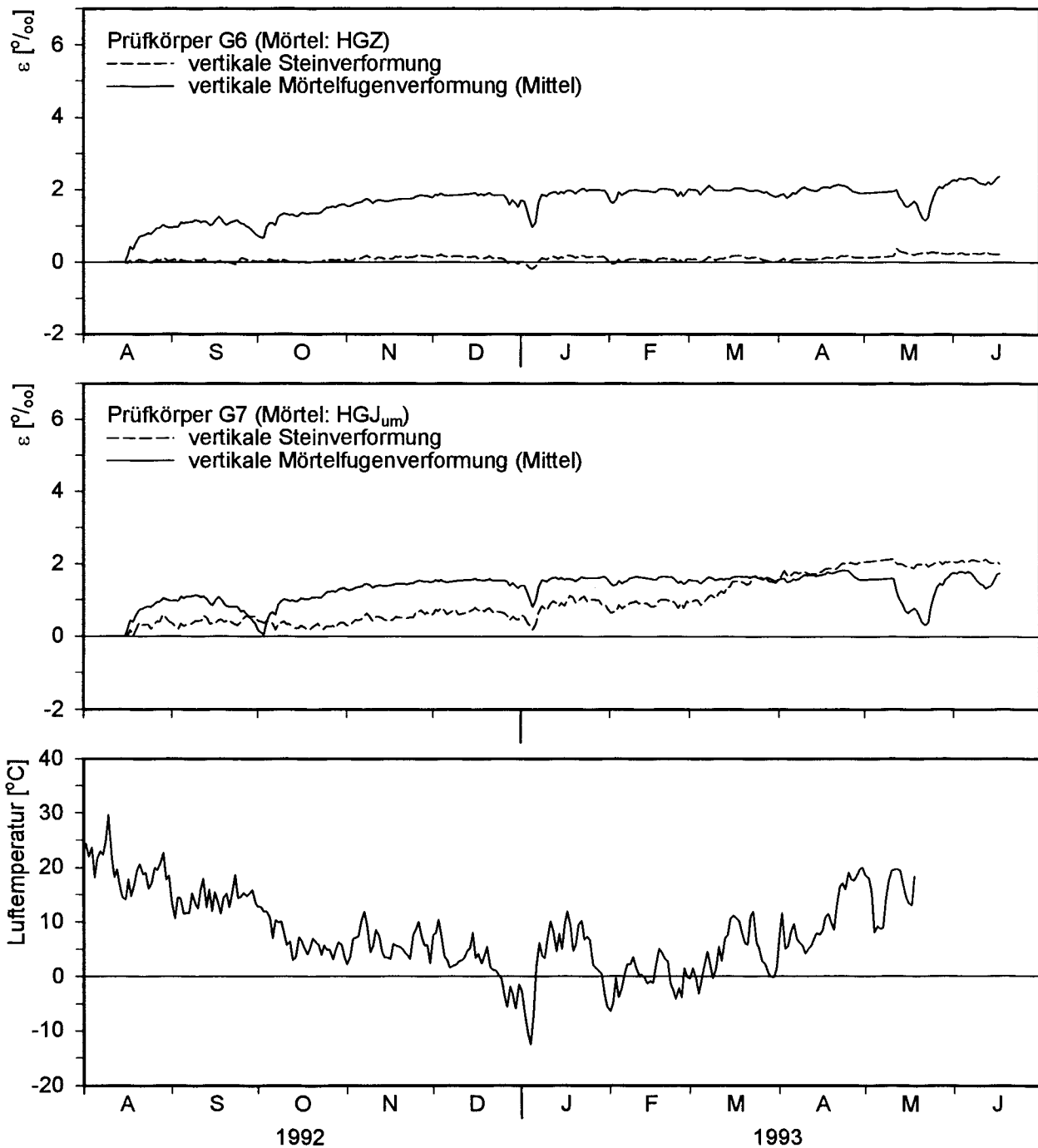
Verformungsuntersuchungen an der MPA Braunschweig (Freibewitterung) Dreisteinkörper



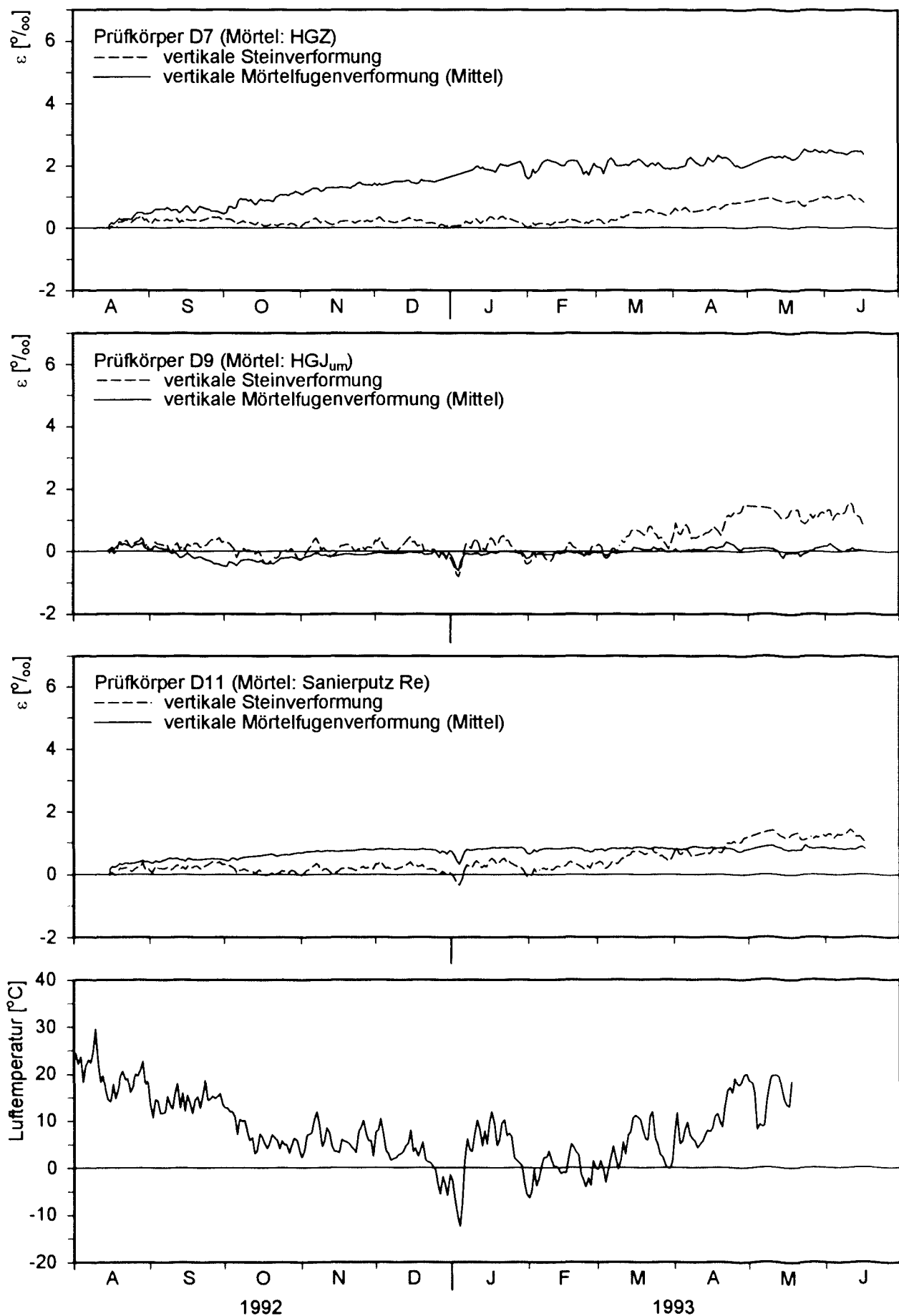
- 1 - 4: SDM vertikal über Fuge hinweg
- 5 - 8: SDM horizontal auf Fuge
- 9, 10: SDM vertikal auf Stein
- 11, 12: SDM horizontal auf Stein
- 13, 15: IWM vertikal über Fuge hinweg
- 14: IWM vertikal auf Stein



Freibewitterung an der MPA Braunschweig
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Sander Schilfsandstein
 14.08.92 - 17.06.93
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

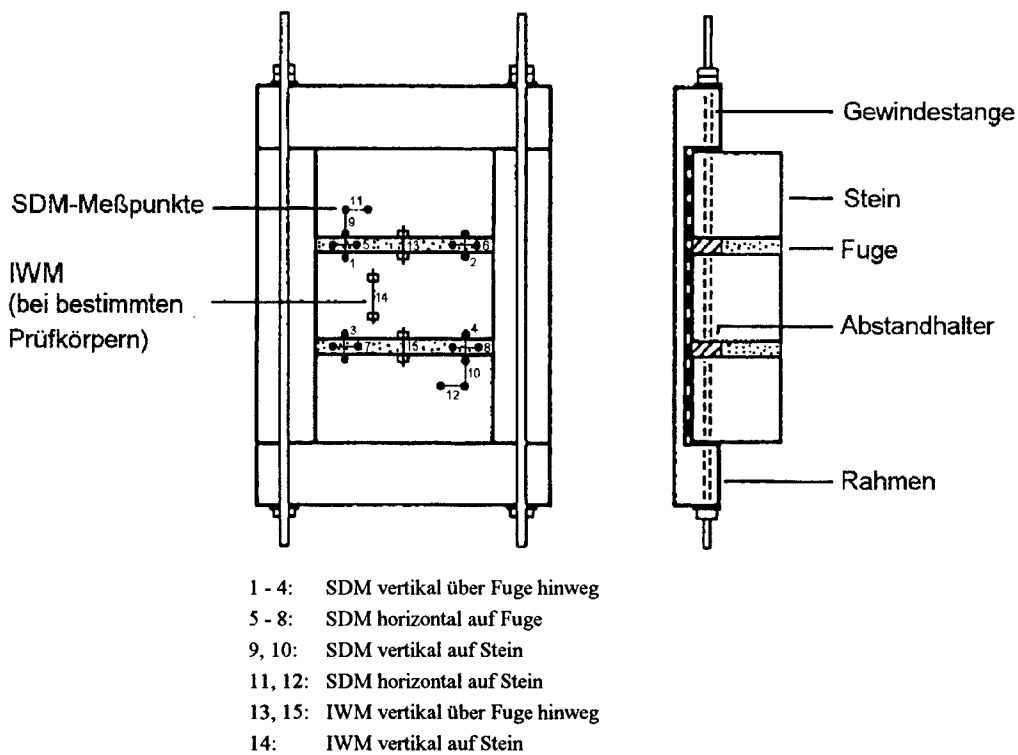


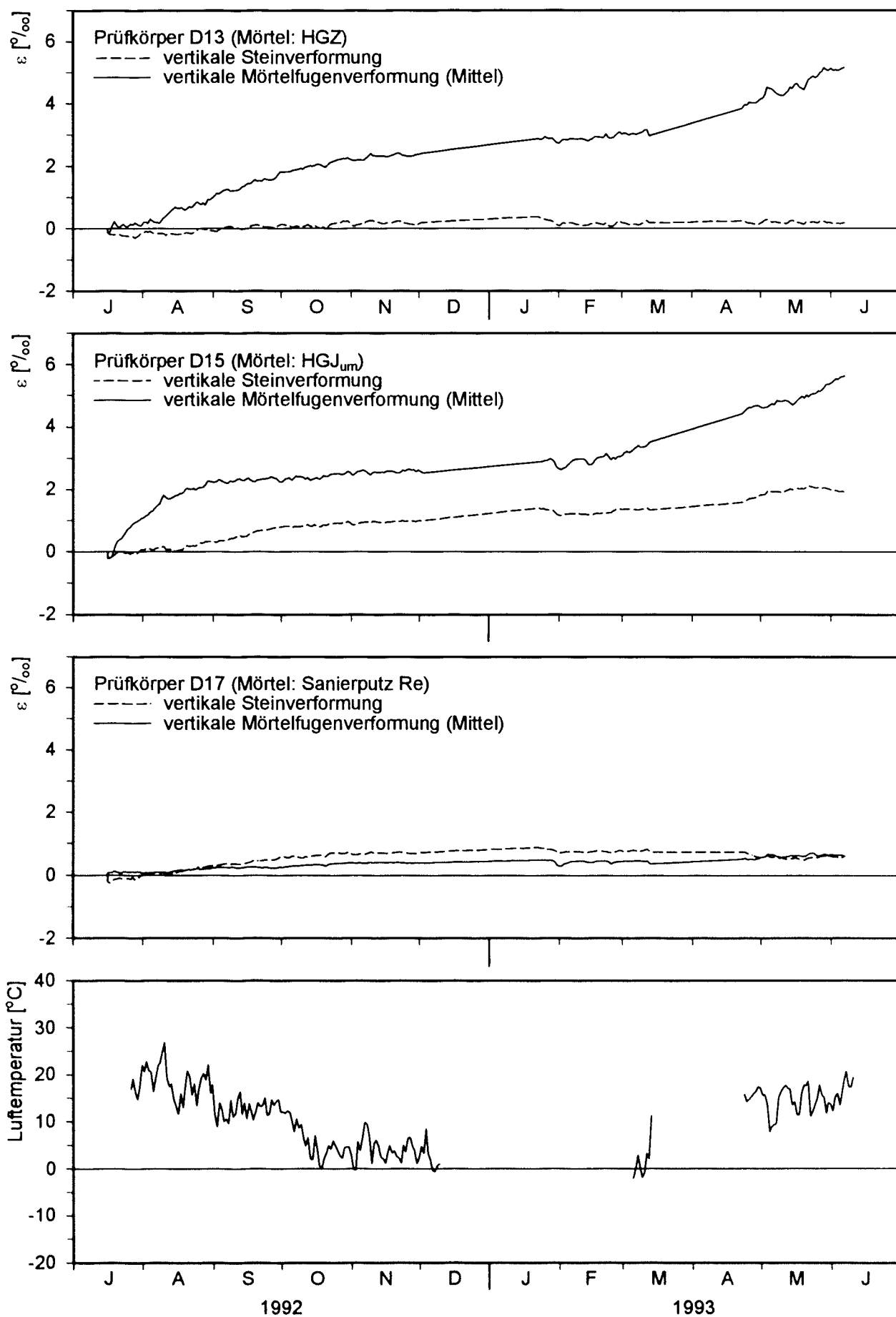
Freibewitterung an der MPA Braunschweig
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Grünsandstein
 01.08.92 - 17.06.93
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm



Freibewitterung an der MPA Braunschweig
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 14.08.92 - 07.06.93
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

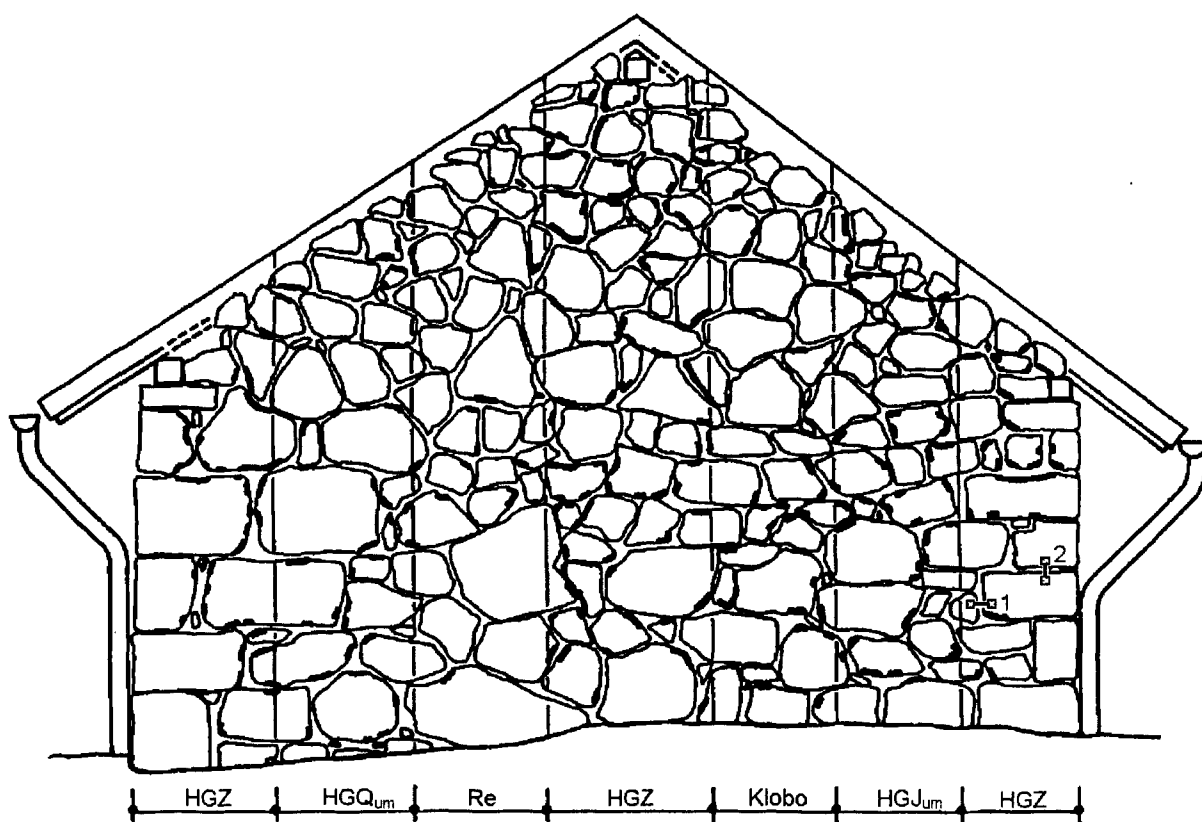
Verformungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried, Dreisteinkörper



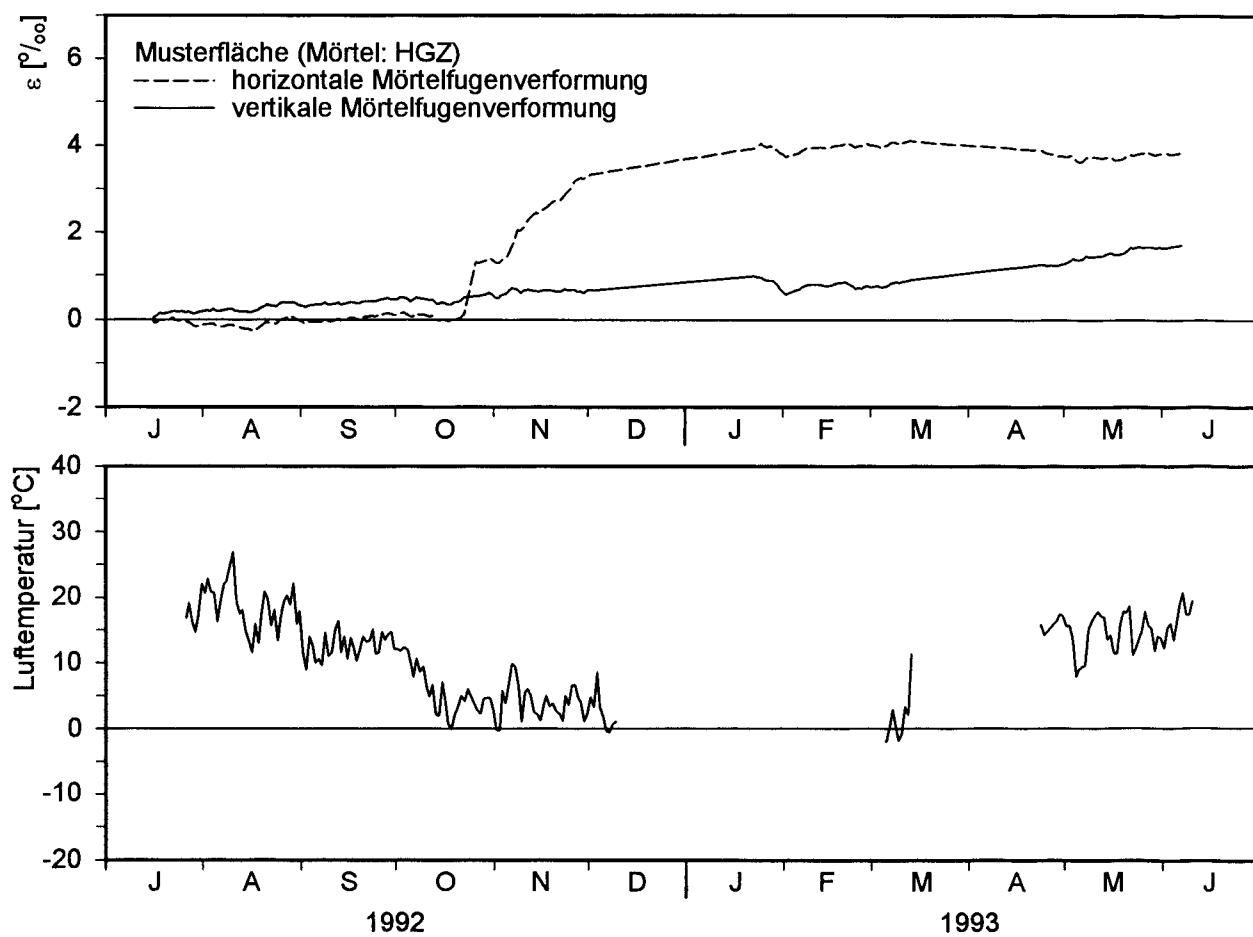


Freibewitterung am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 15.07.92 - 07.06.93
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

Verformungsuntersuchungen am Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried, Übungsfläche



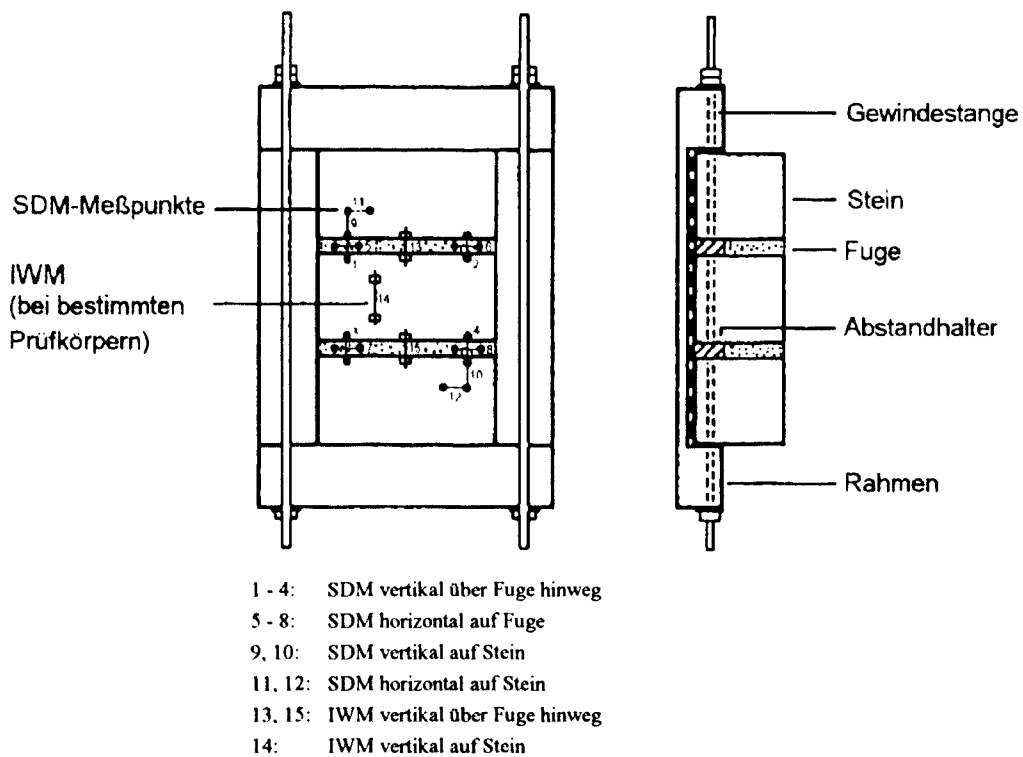
- 1: IWM horizontal über Fuge hinweg
- 2: IWM vertikal über Fuge hinweg

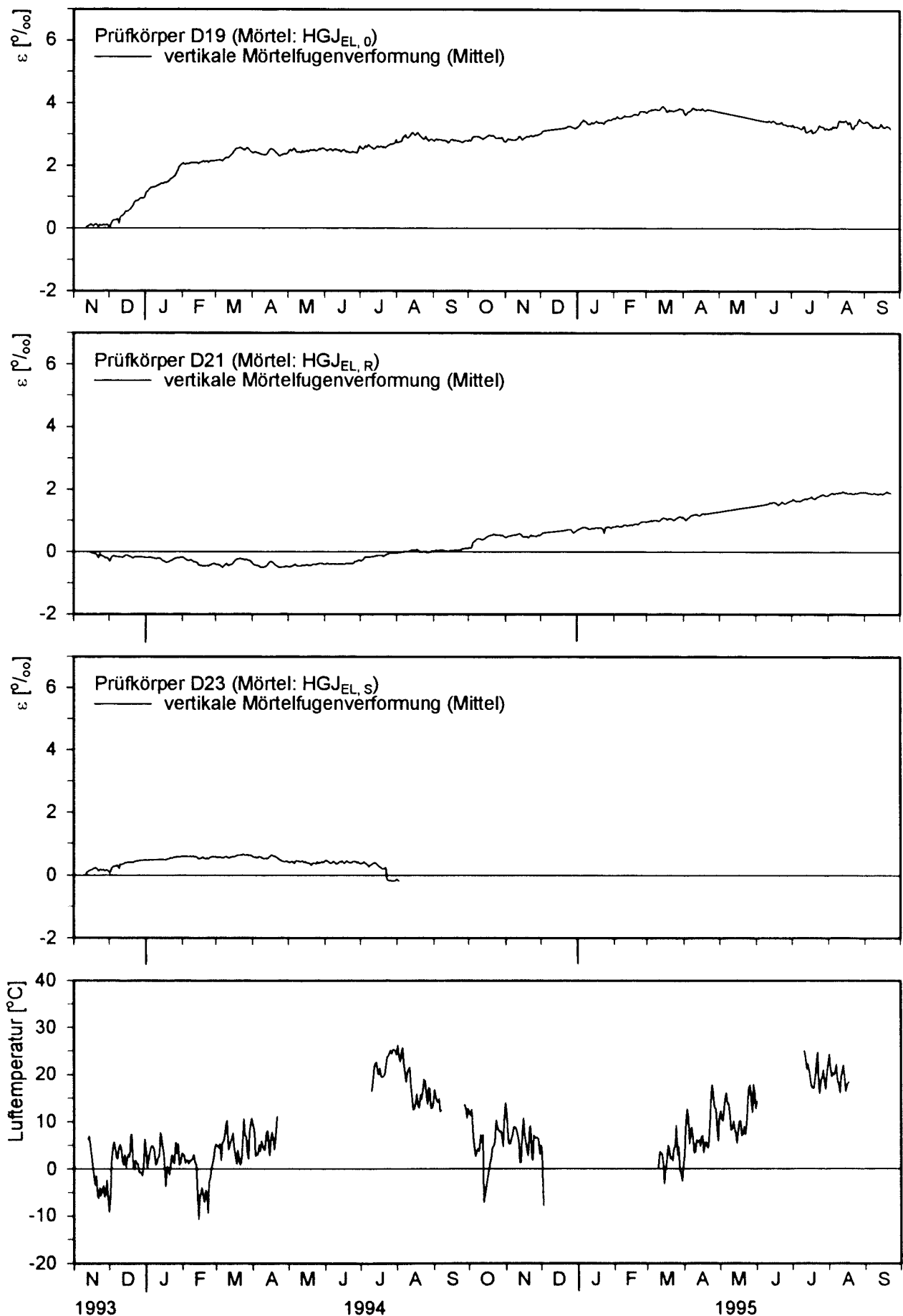


Wirtschaftsgebäude des ehem. Klosters Walkenried
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 15.07.92 - 07.06.93

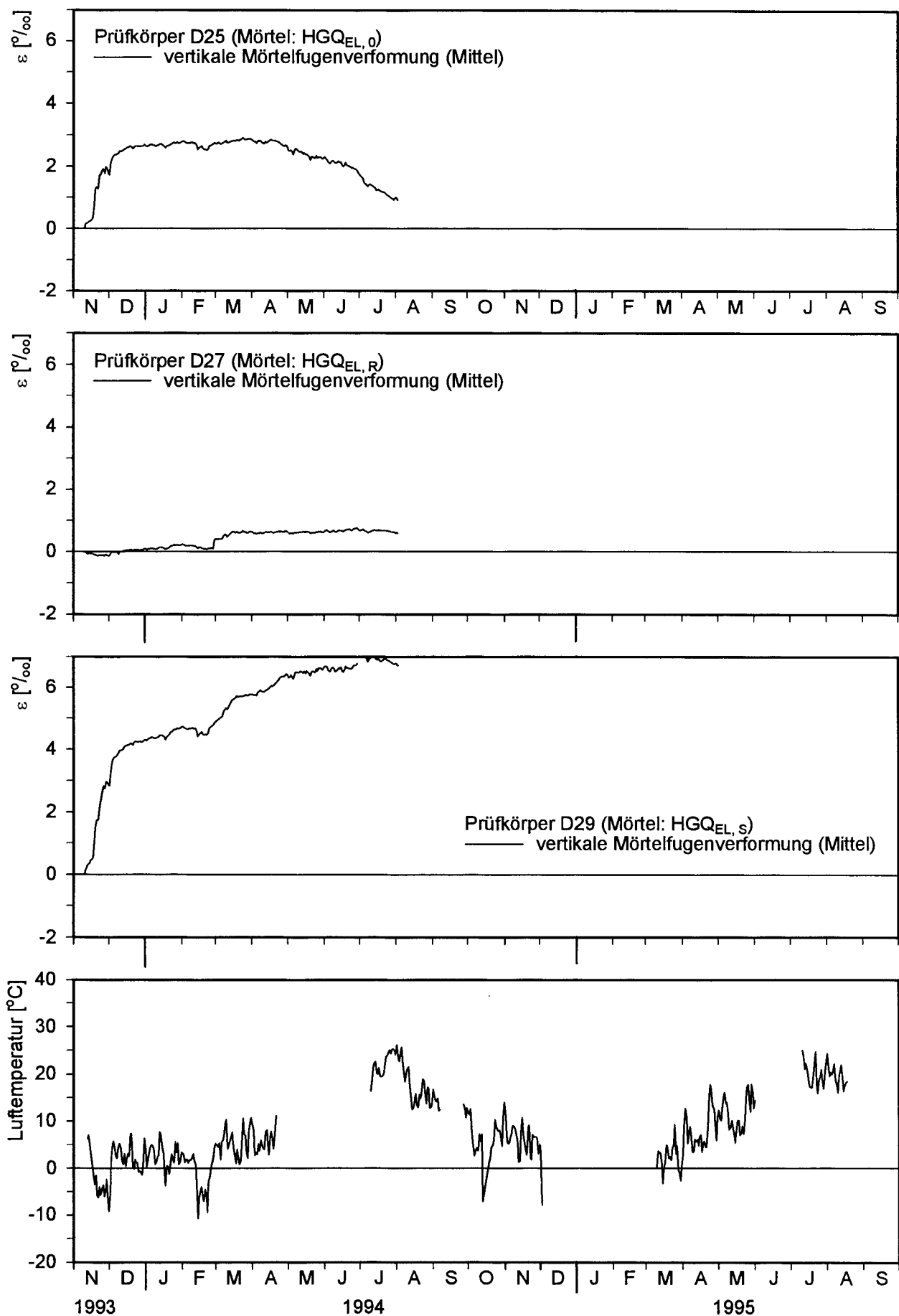
Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm

Verformungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich, Dreisteinkörper

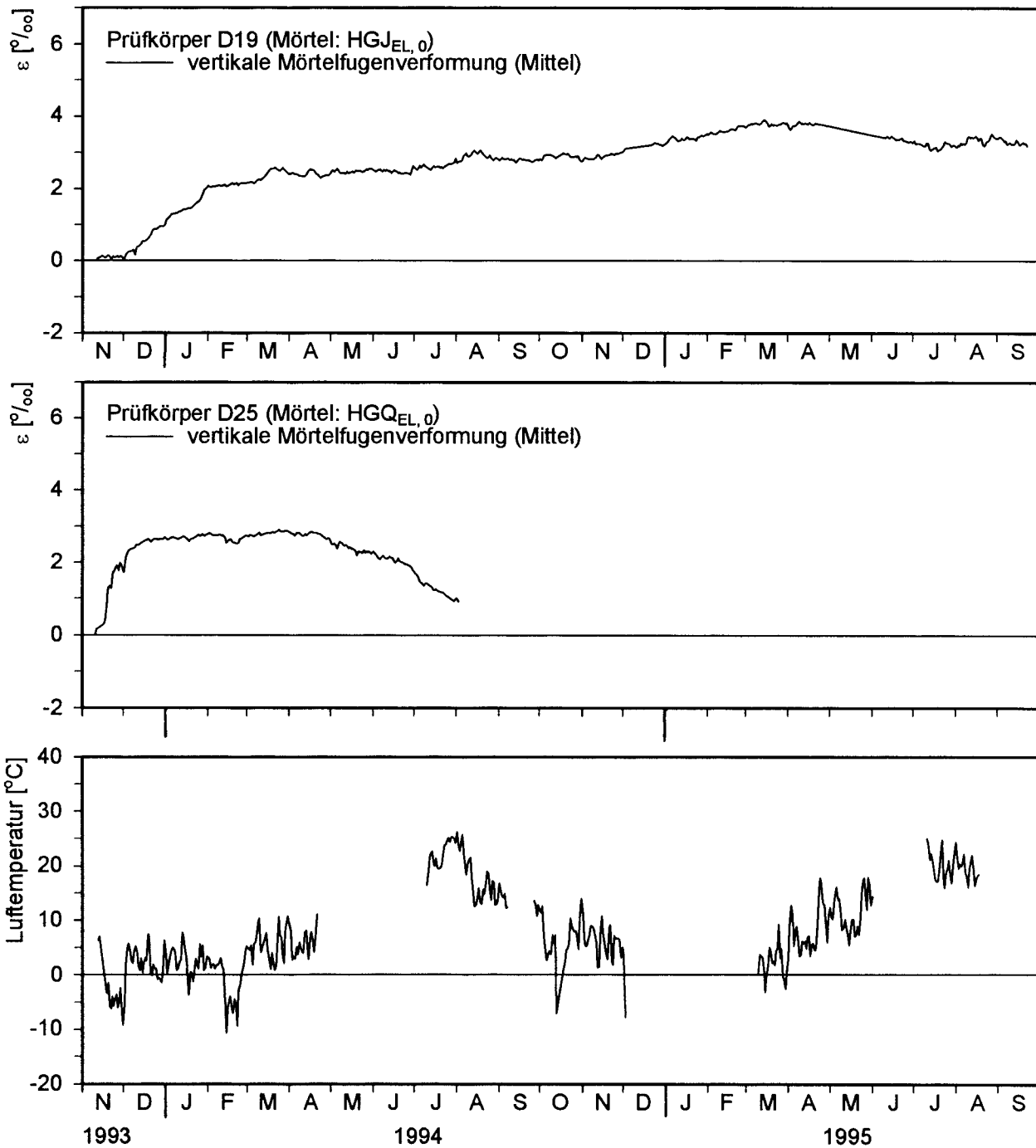




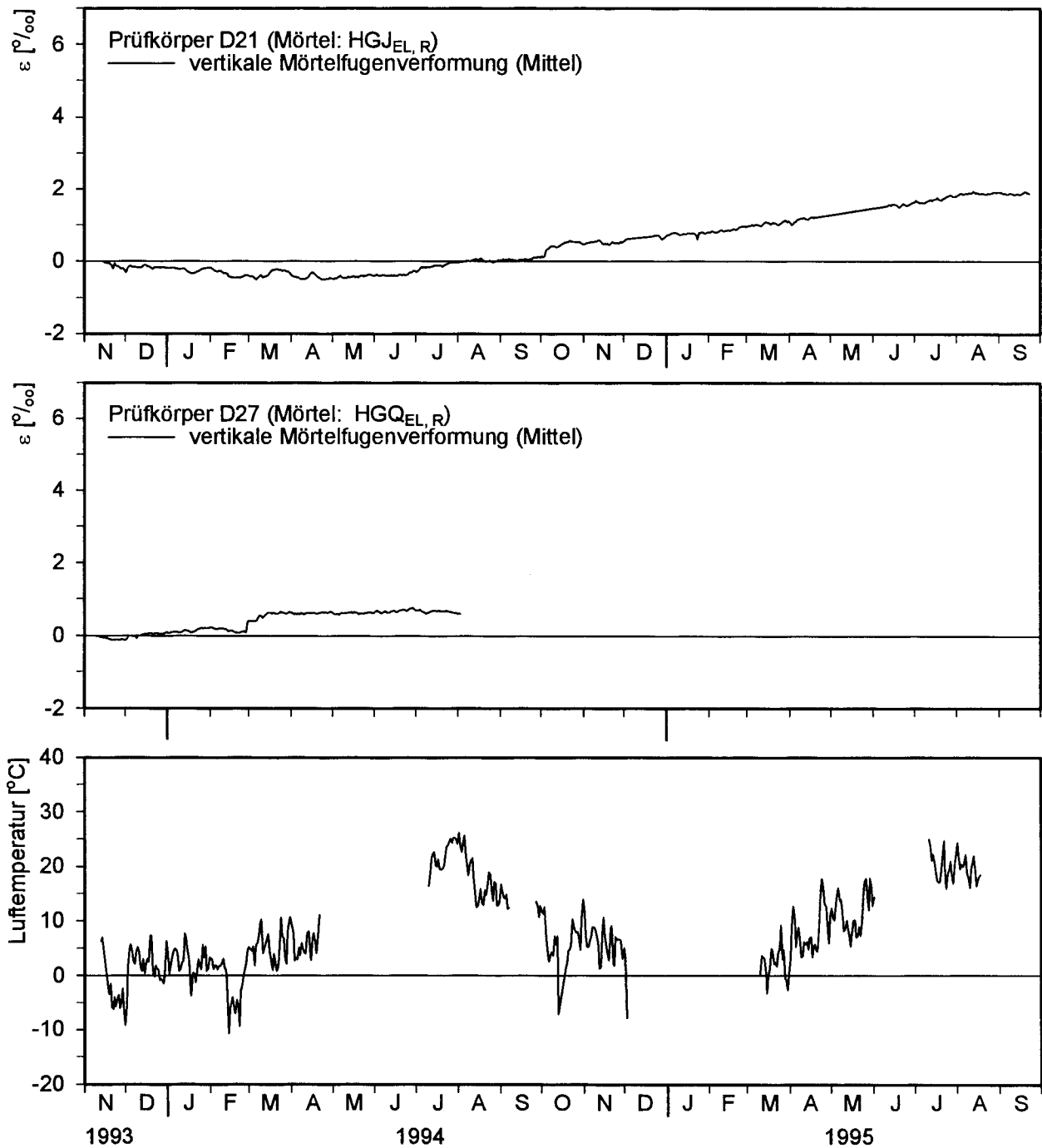
Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 02.08.94 bzw. 23.09.95
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm



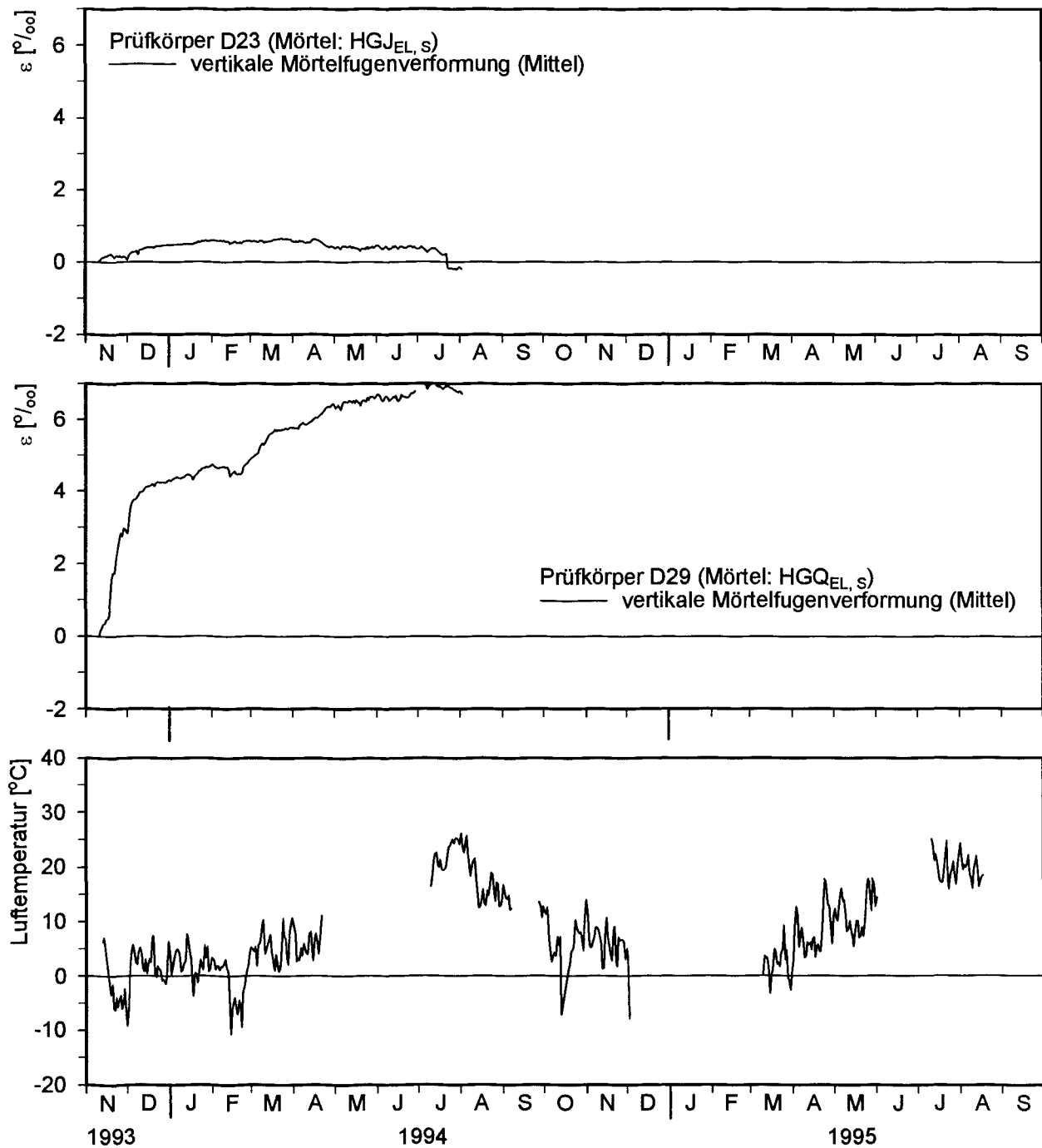
Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 02.08.94
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm



Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 02.08.94 bzw. 23.09.95
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

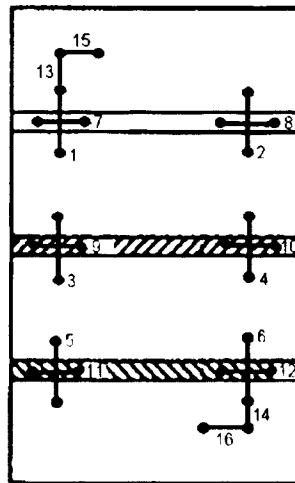


Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 02.08.94 bzw. 23.09.95
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm






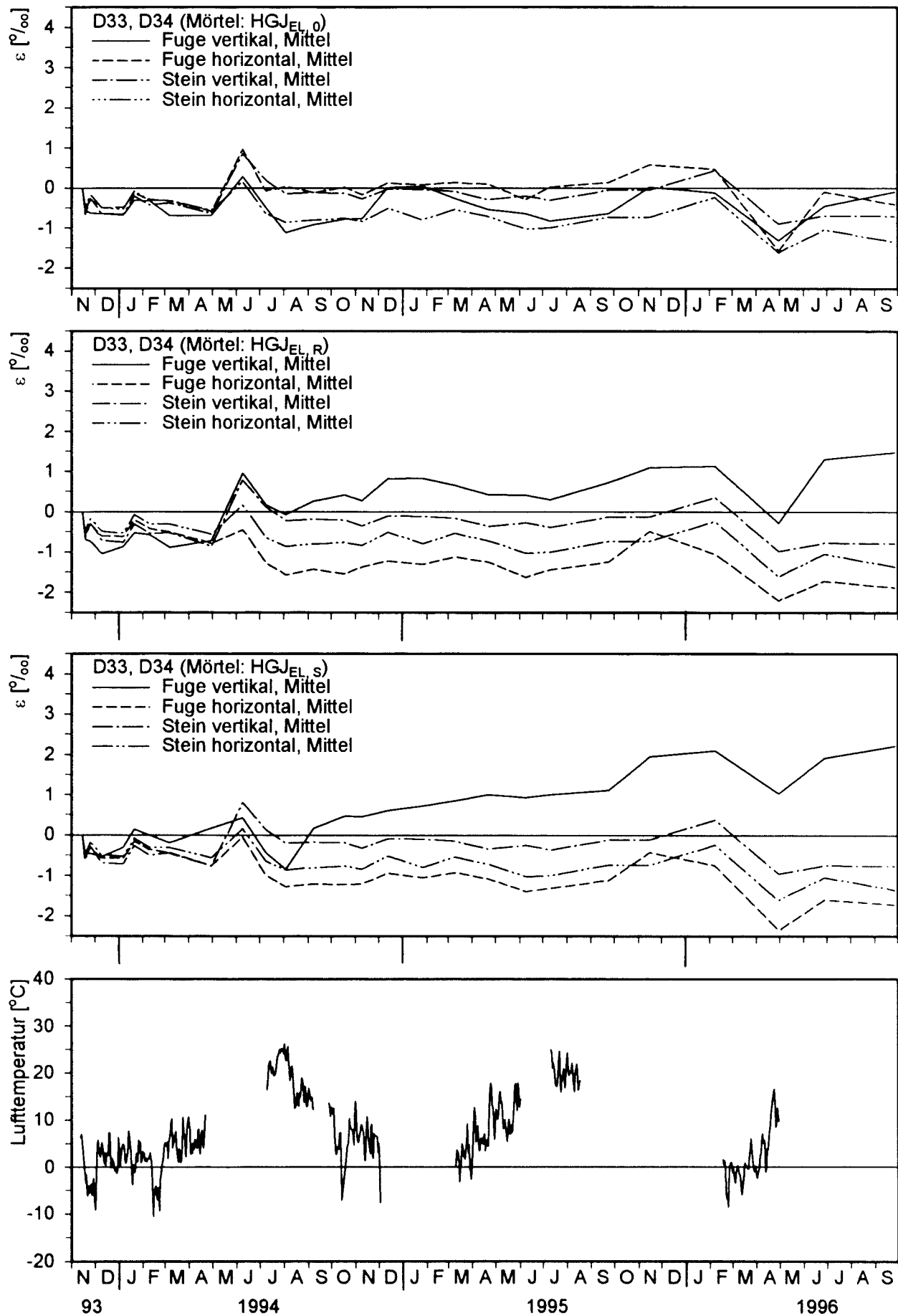
Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 02.08.95
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

Verformungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich, Viersteinkörper

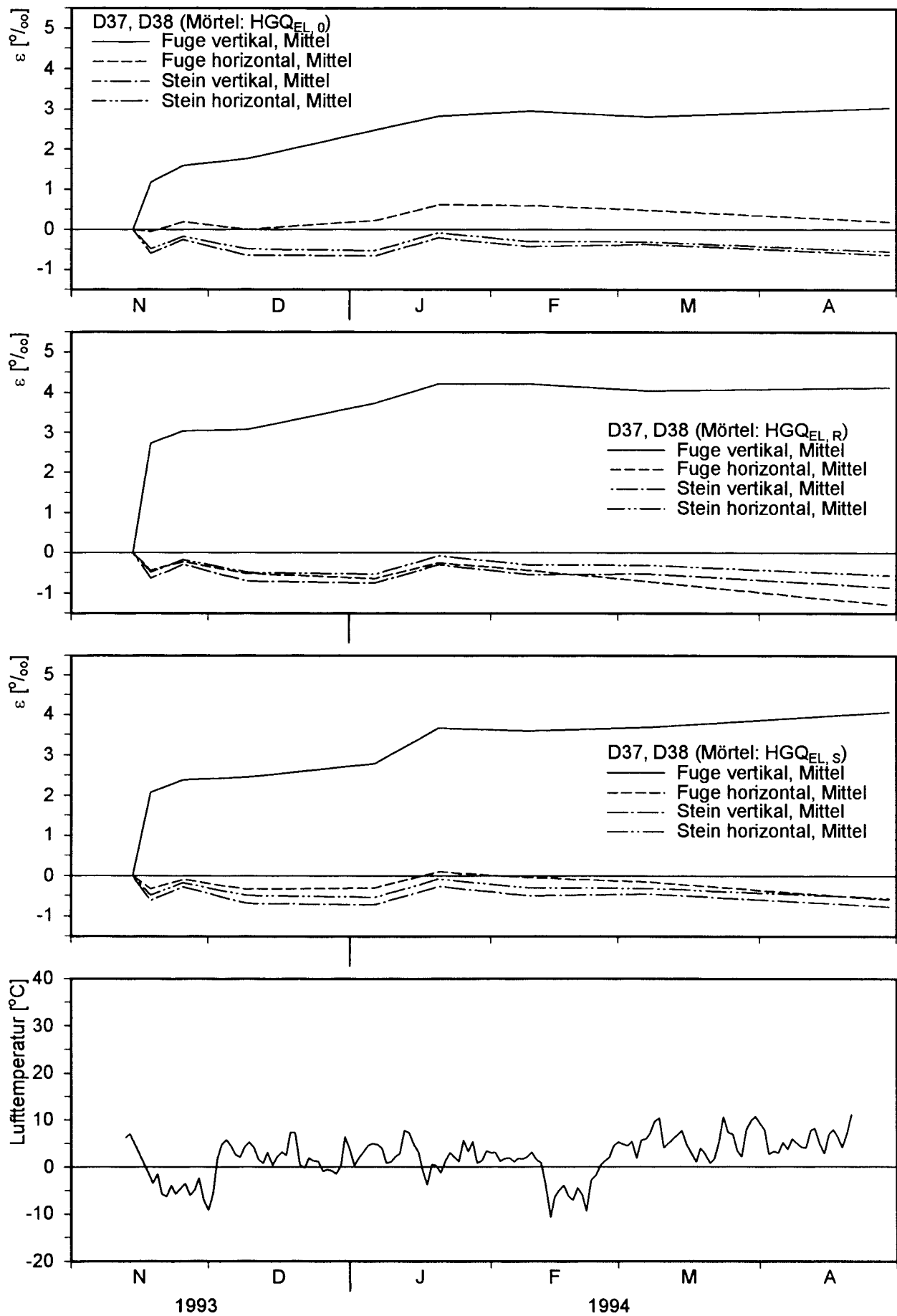


- 1 - 6: SDM vertikal über Fuge hinweg
- 7 - 12: SDM horizontal auf Fuge
- 13, 14: SDM vertikal auf Stein
- 15, 16: SDM horizontal auf Stein

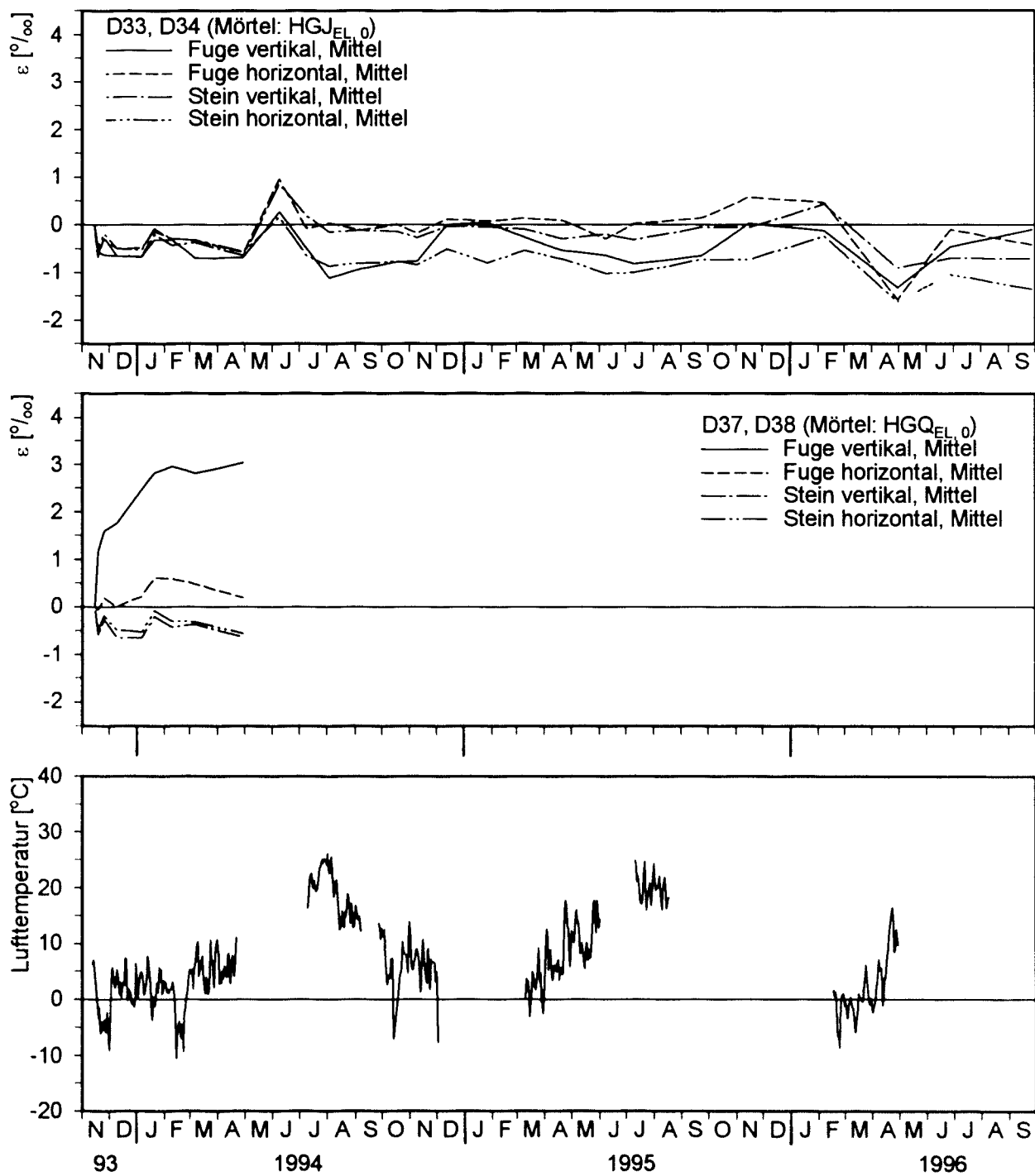
-  ohne Deckmörtel
-  Deckmörtel *Re*
-  Deckmörtel *St*



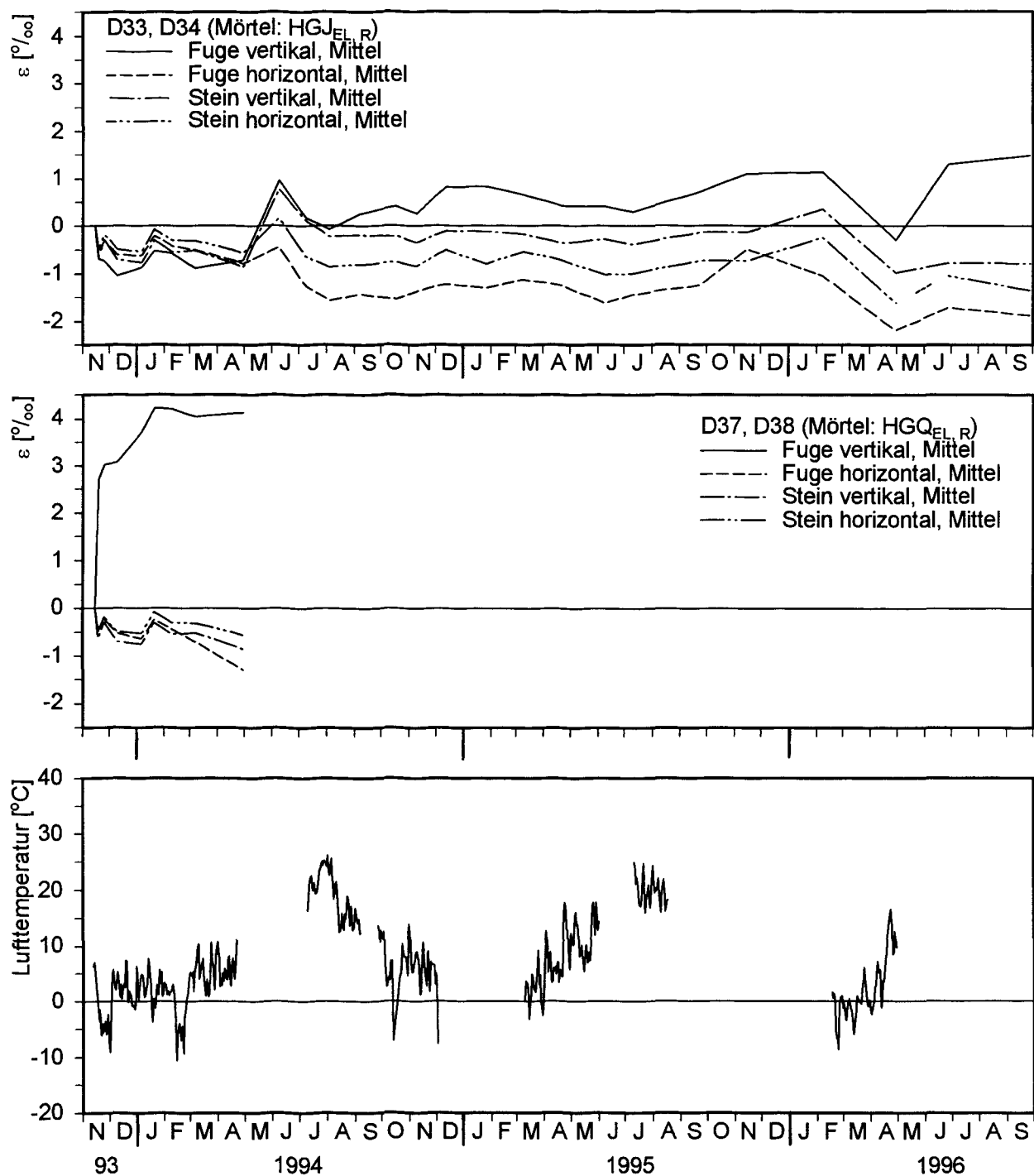
Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Viersteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 27.09.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm



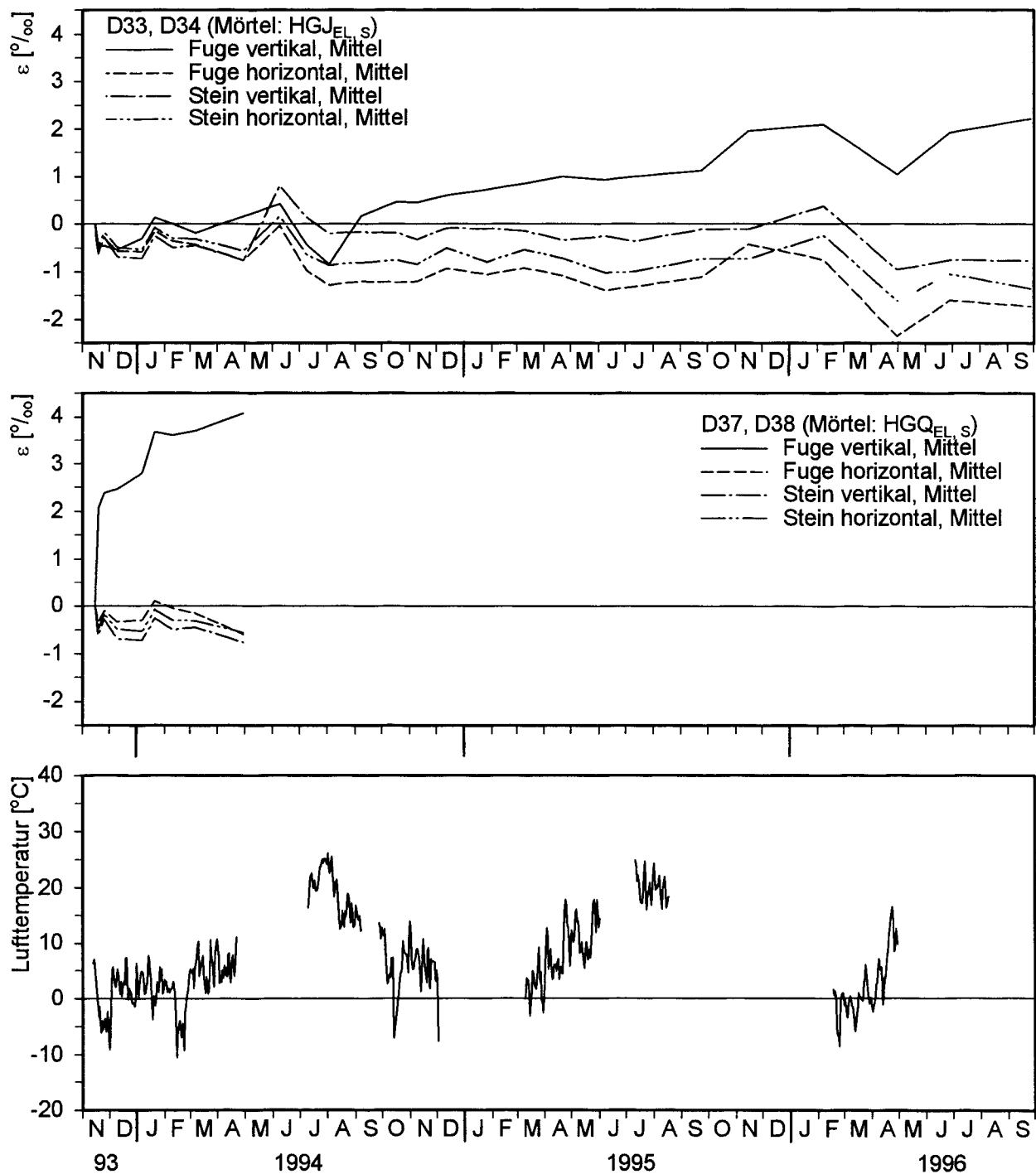
Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Viersteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 29.04.94
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm



Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Viersteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 29.04.94 bzw. 27.09.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

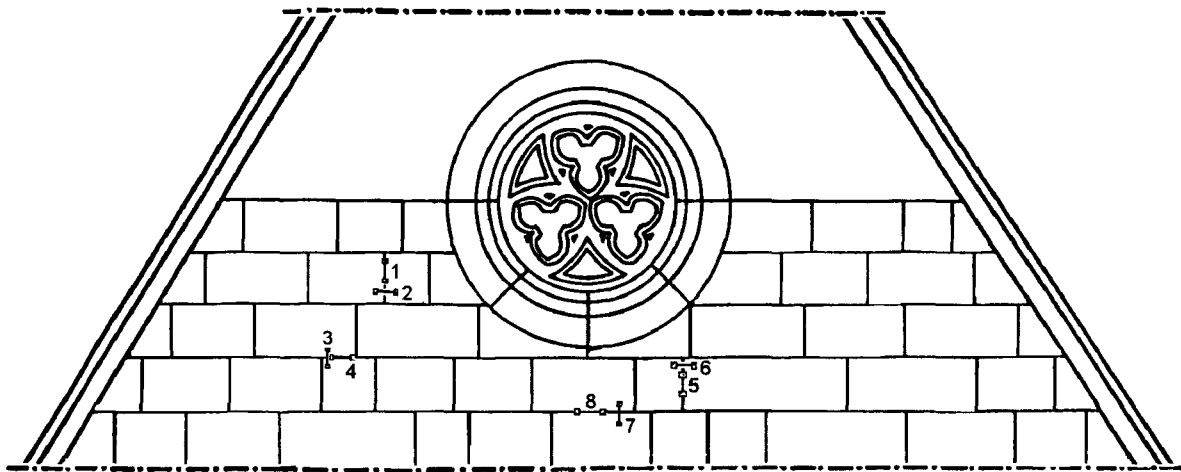


Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Viersteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 29.04.94 bzw. 27.09.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

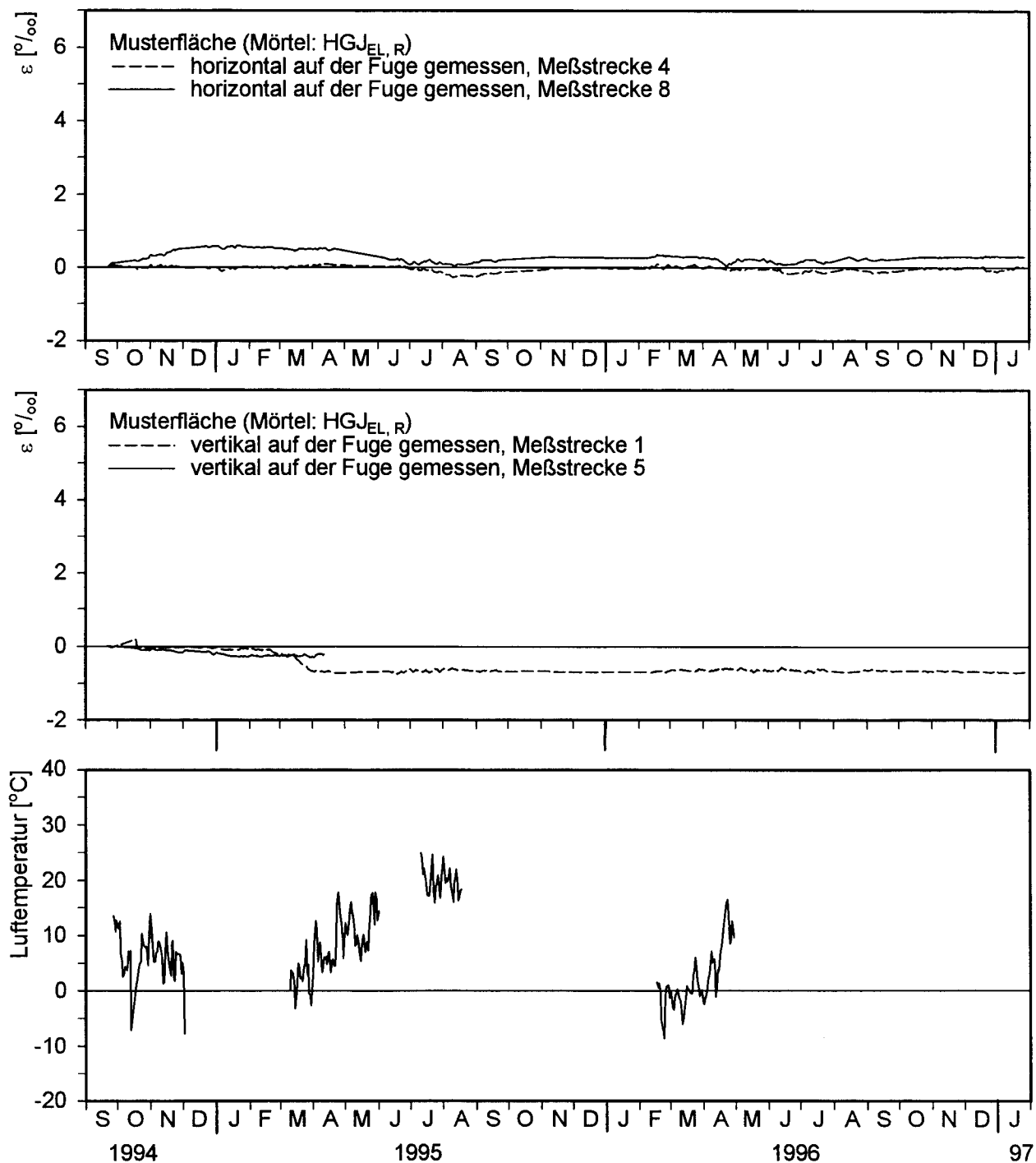


Freibewitterung an der Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Setzdehnungsmessung an Viersteinkörpern aus Dolomit
 10.11.93 - 29.04.94 bzw. 27.09.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

Verformungsuntersuchungen an der Kirche St. Johannis in Ellrich, Musterfläche

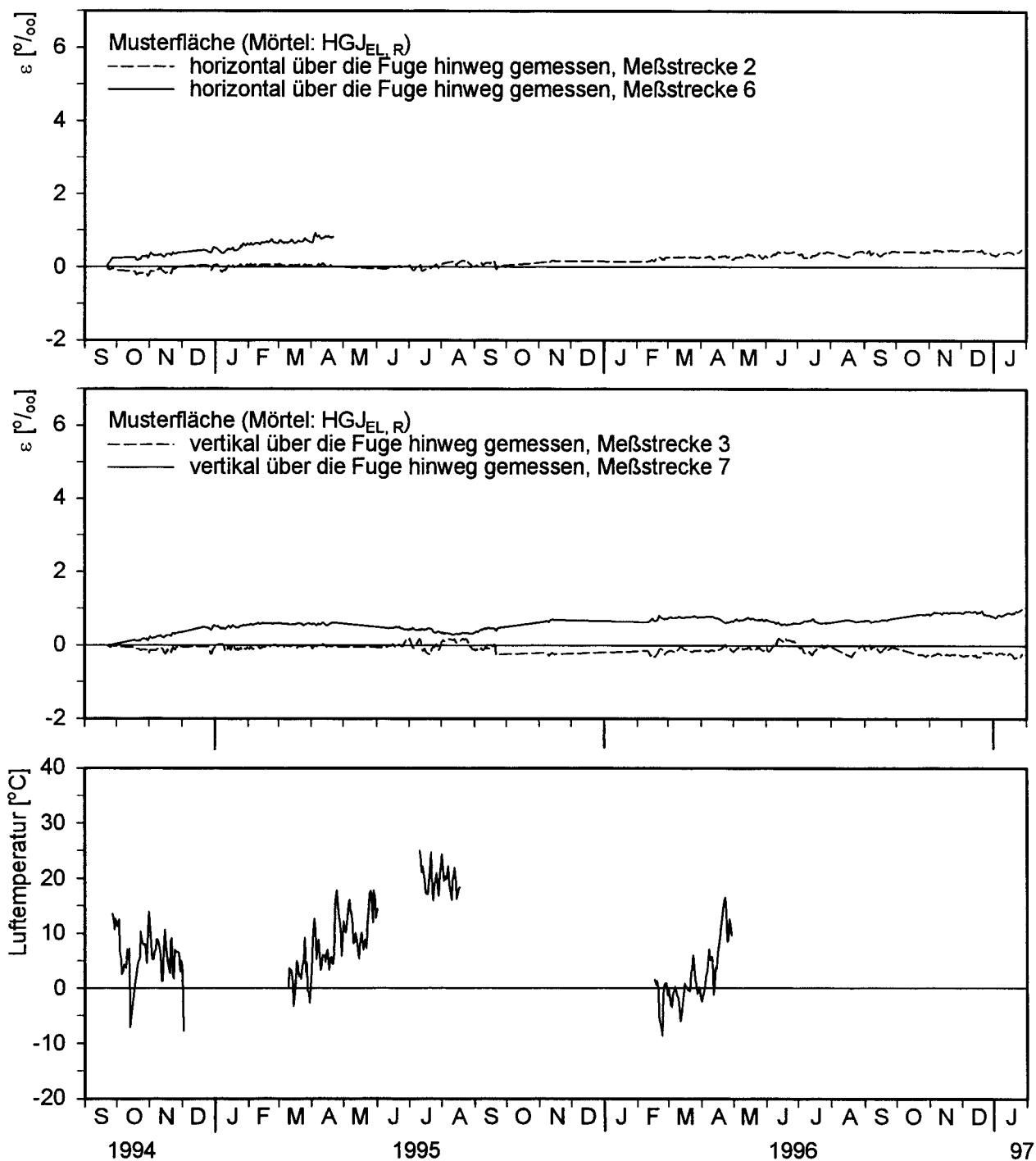


- 1, 5: IWM vertikal auf Fuge
- 2, 6: IWM horizontal über Fuge hinweg
- 3, 7: IWM vertikal über Fuge hinweg
- 4, 8: IWM horizontal auf Fuge



Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 22.09.94 - 27.01.97

Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm

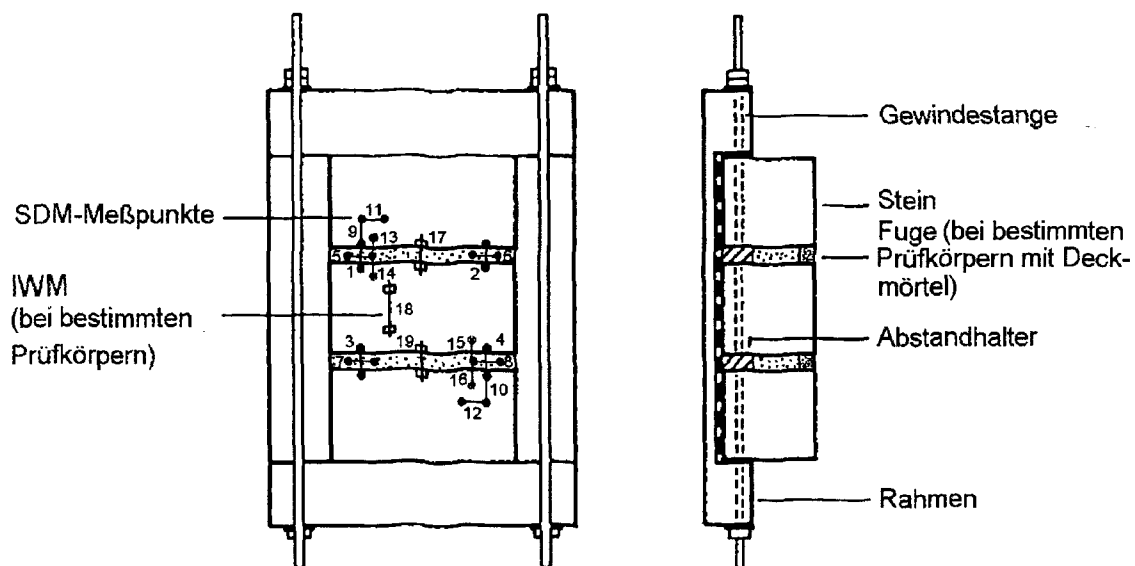


Kirche St. Johannis in Ellrich
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 22.09.94 - 27.01.97

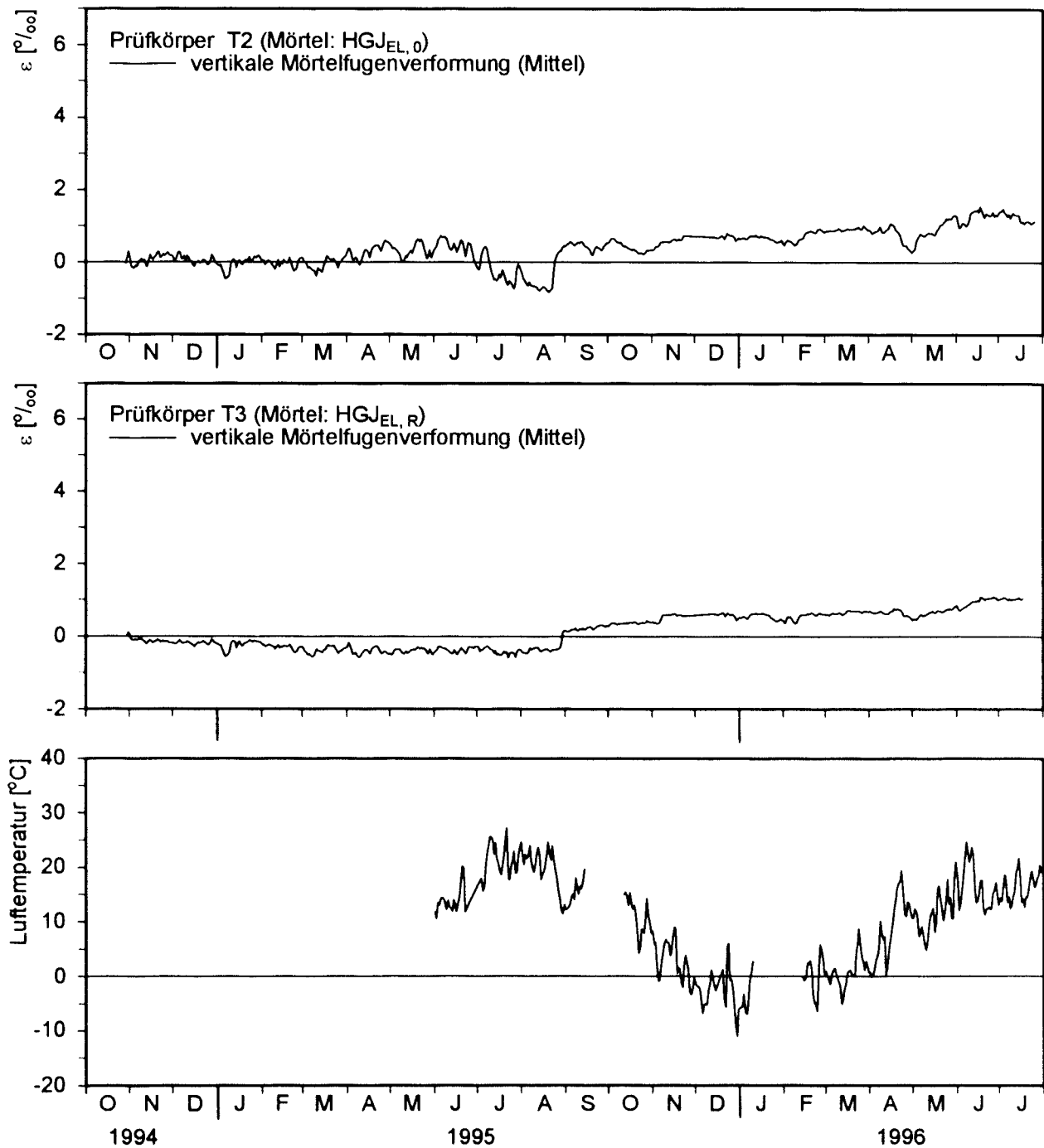
Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm

A27

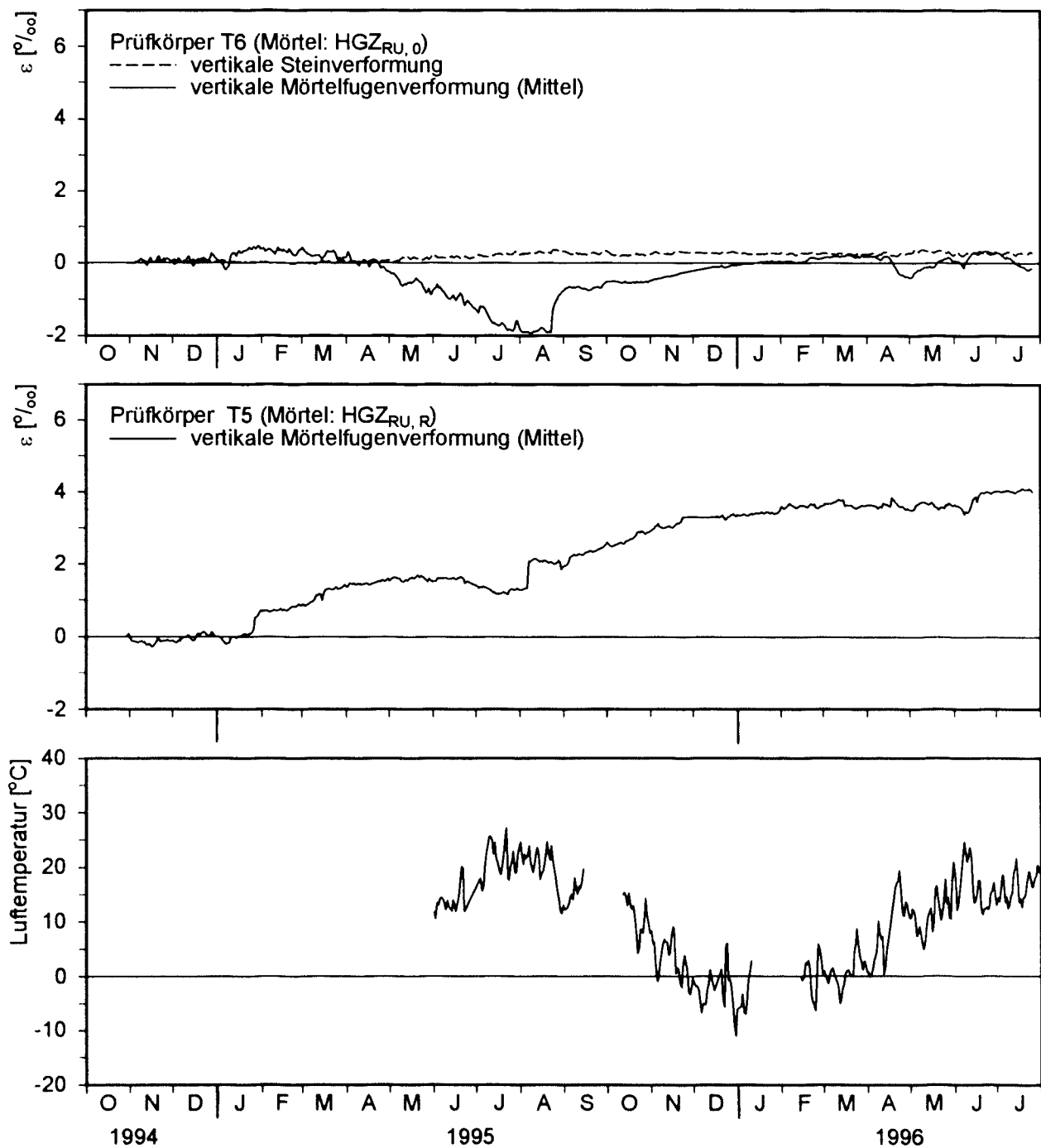
Verformungsuntersuchungen an der Runneburg Weißensee, Dreisteinkörper



- 1 - 4: SDM vertikal über Fuge hinweg
- 5 - 8: SDM horizontal auf Fuge
- 9, 10: SDM vertikal auf Stein
- 11, 12: SDM horizontal auf Stein
- 13 - 16: SDM vertikal Fuge - Stein
- 17, 19: IWM vertikal über Fuge hinweg
- 16: IWM vertikal auf Stein

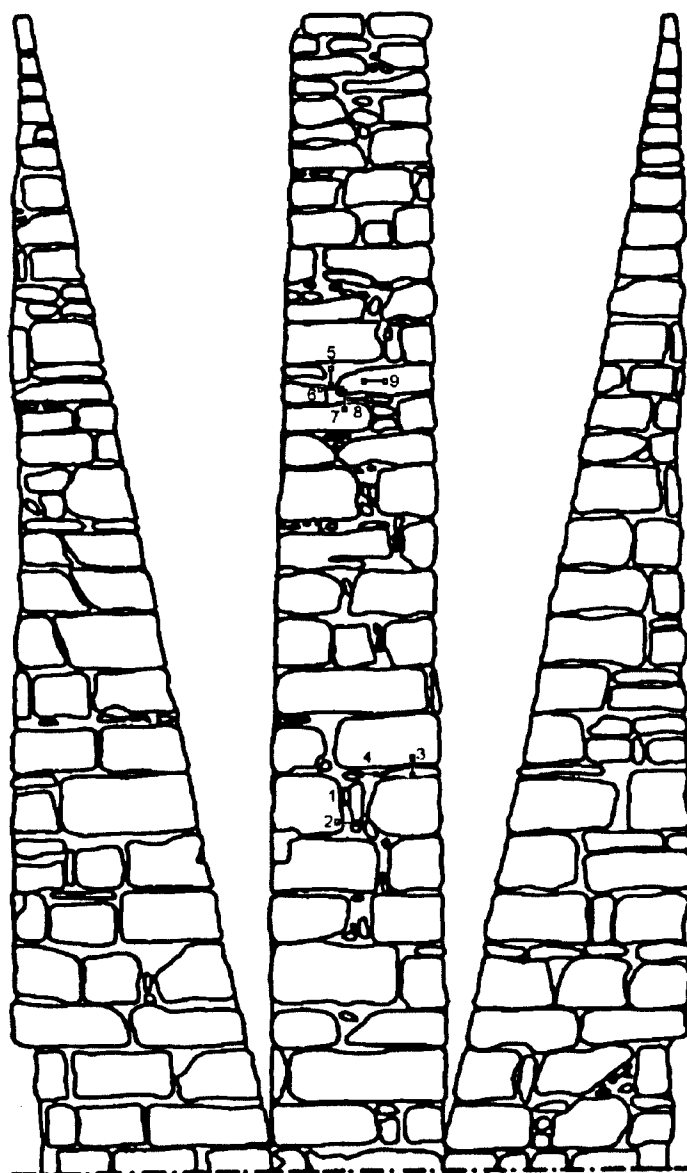


Freibewitterung an der Runneburg in Weißensee
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Travertin
 28.10.94 - 26.07.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

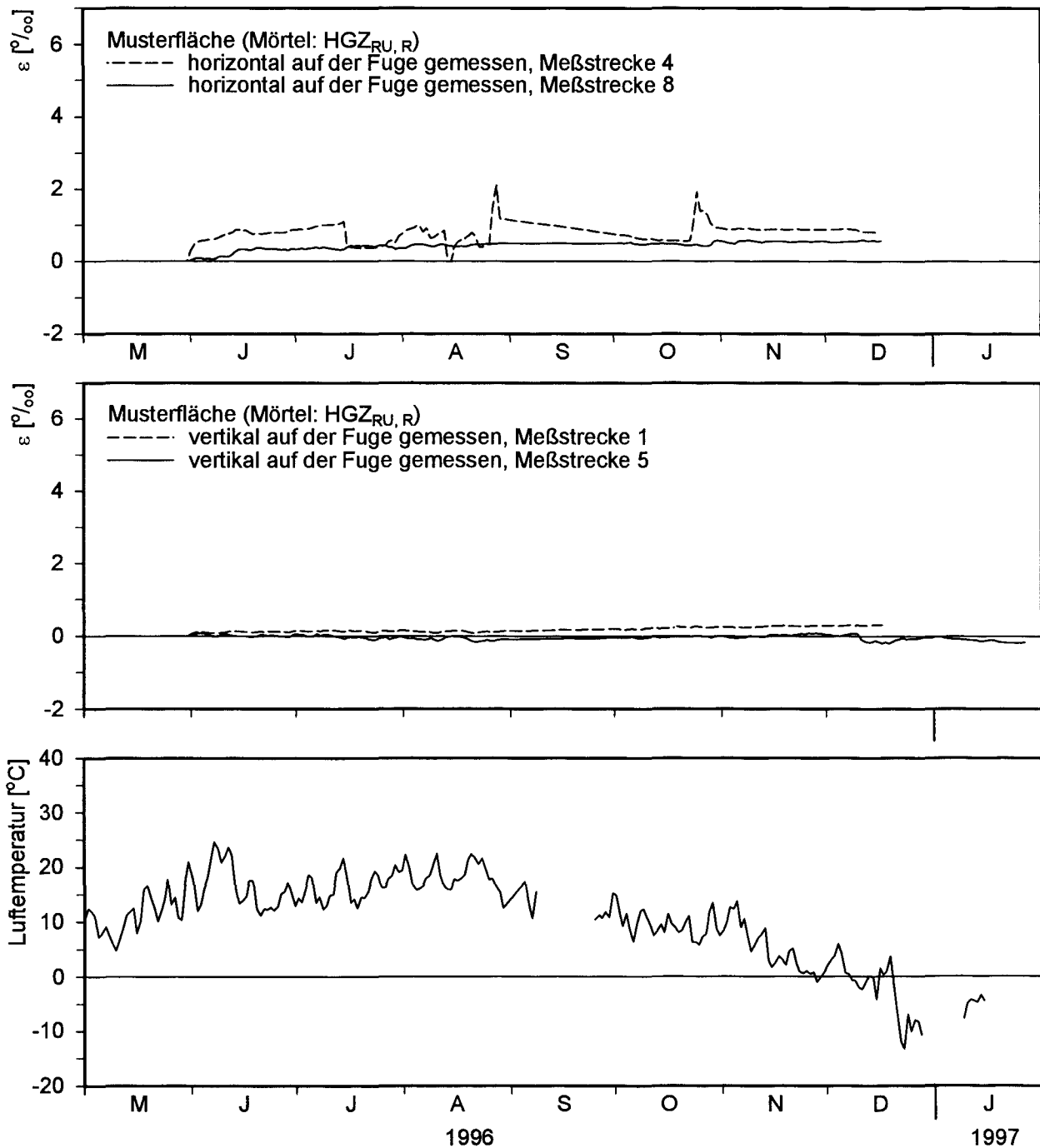


Freibewitterung an der Runneburg in Weißensee
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an Dreisteinkörpern aus Travertin
 28.10.94 - 26.07.96
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe von 2 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 3 cm

Verformungsuntersuchungen an der Runneburg Weißensee, Musterfläche

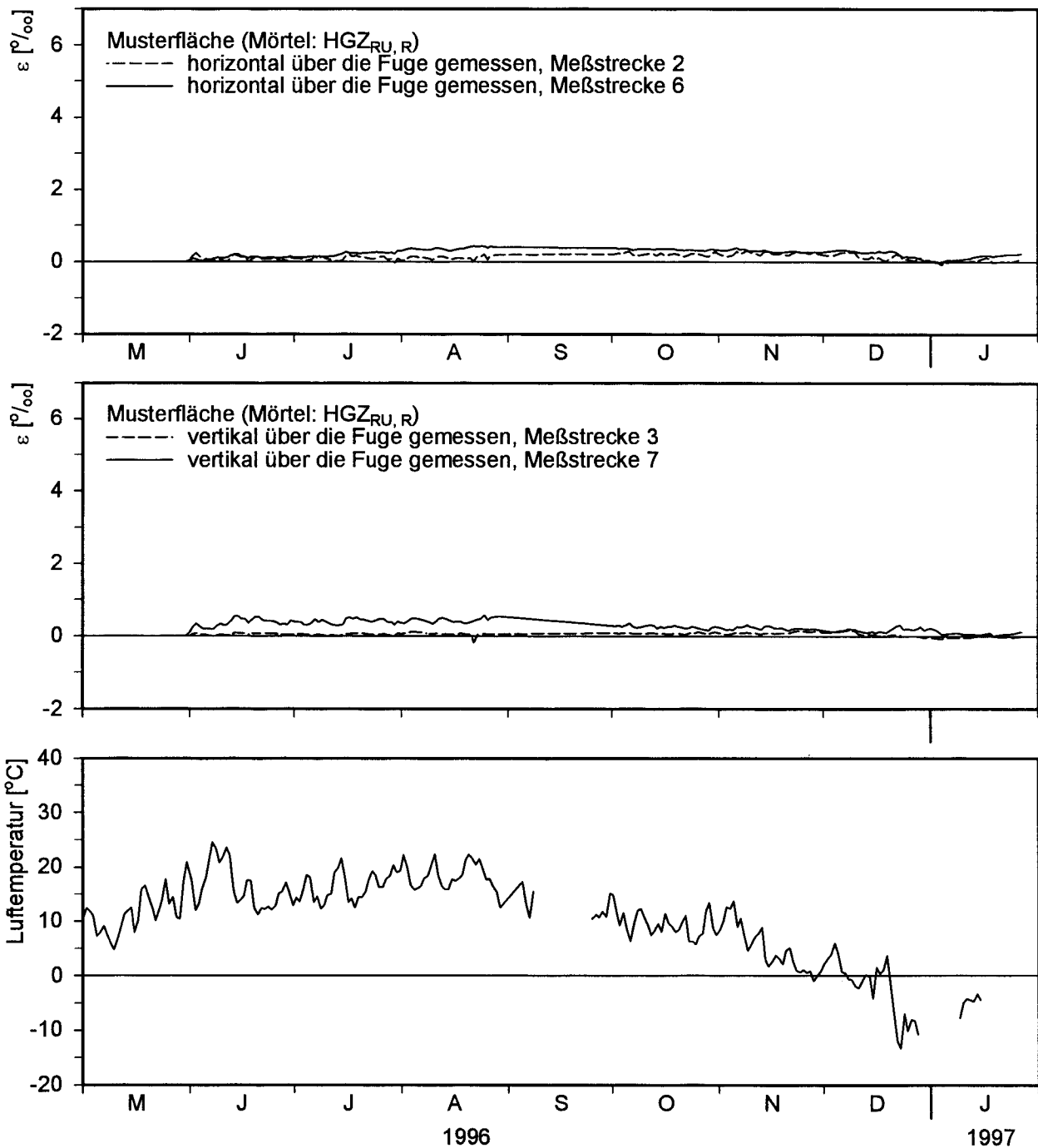


- 1, 5: IWM vertikal auf Fuge
- 2, 6: IWM horizontal über Fuge hinweg
- 3, 7: IWM vertikal über Fuge hinweg
- 4, 8: IWM horizontal auf Fuge



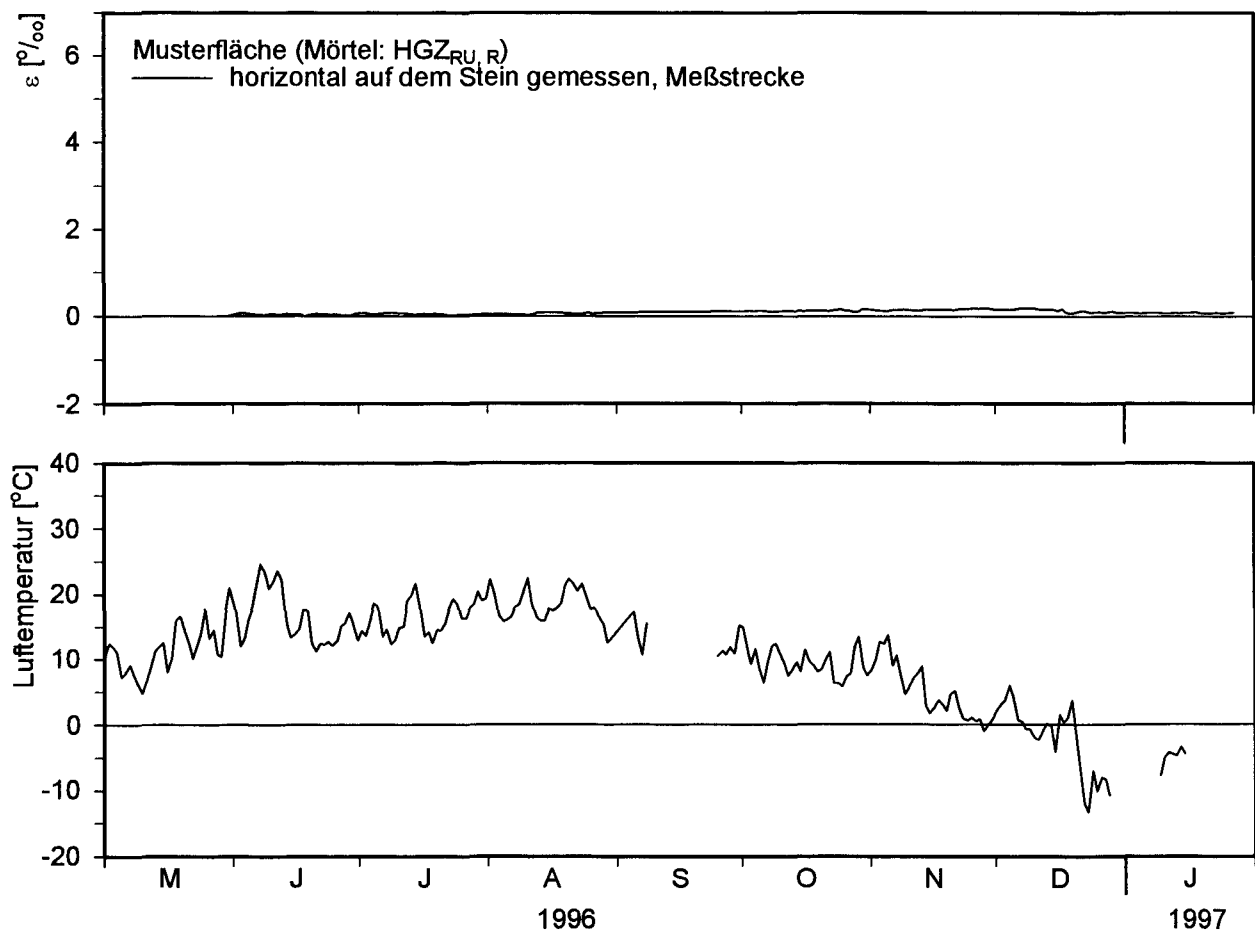
Runneburg in Weißensee
 Verformungsuntersuchungen mittels induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 31.05.96 - 21.01.97

Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm



Runneburg in Weißensee
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 31.05.96 - 21.01.97

Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm



Runneburg in Weißensee
 Verformungsuntersuchungen mittels Induktiver Wegaufnahme an der Musterfläche
 31.05.96 - 21.01.97
 Ergebnisse an Mörtelfugen beziehen sich auf eine Fugenhöhe und -breite von ca. 3 cm bzw. Meßstreckenlänge von ca. 4 cm